

# **Otimização de uma impressora 3D Delta e desenvolvimento da impressão simultânea de 3 cores**

*Joaquim José Linhares Moreira Regadas*

**Dissertação de Mestrado**

Orientador na FEUP: Professor Doutor Jorge Lino

Co-Orientador no INEGI: Engenheiro Santiago Castellanos (MSc)



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Junho 2017

*“A persistência é o caminho do êxito.”*

*- Charles Chaplin*

## Resumo

A presente dissertação surge na continuação de uma outra, na qual foi desenvolvida uma impressora 3D Delta para impressão através da modelação por extrusão de plástico. Estudou-se o processo de modelação por extrusão de plástico, o tipo de impressora desenvolvida e o tipo de extrusor utilizado. Realizou-se a revisão bibliográfica para que fosse possível iniciar a componente prática do trabalho, que consistiu na utilização e otimização da impressora disponibilizada e no seu estudo mais aprofundado.

A impressora foi alvo de um processo de *retrofitting* para que fosse possível otimizar alguns dos seus componentes. Para comparação com a impressora em estudo, foi realizado um estudo de mercado deste tipo de impressoras para identificação de alguns componentes que pudessem ser reorganizados ou otimizados.

De seguida, foram implementadas as melhorias que se pensaram ser as mais pertinentes e efetuadas as calibrações necessárias para realização de impressões. O objetivo final destas melhorias passa pelo desenvolvimento da impressora para impressão simultânea a três cores, por este mesmo motivo houve a necessidade de adicionar alguns componentes para permitir este tipo de impressão.

Por fim, foram realizadas várias impressões em que foram utilizados três filamentos com cores distintas e discutidos os resultados obtidos para obtenção das respetivas conclusões do trabalho realizado. Ainda se indicaram trabalhos futuros, para que se continue a desenvolver uma investigação acerca dos processos de impressão multicolor utilizando a impressora que foi alvo de otimização ao longo deste trabalho.

# **3D Delta printer optimization and development of simultaneous 3-color printing**

## **Abstract**

The present dissertation is the continuation of another one, in which a Delta 3D printer was developed for printing through fused deposition modelling. It was made a study and research about the fused deposition modelling process, the type of printer developed and the type of extruder used. With the bibliographical review done, it was possible to start the practical component of the work, where the use of the 3D printer made available for the work started and its further study.

The printer has undergone over a retrofitting process to optimize some of its components. For comparison with the printer available, a market research of this type of printers was carried to identify some components that could be reorganized or optimized.

Then the improvements that were thought to be the most important were implemented and the calibrations necessary to start the 3D printing were made. The final purpose of these improvements is the development of the printer for simultaneous three-color printing, for this reason there were some components that needed to be added to make this type of printing possible.

Finally, several 3D printings were made in which three filaments with different colors were used and the results obtained to get the respective conclusions of the work were discussed. Further work has been indicated so that the research on multicolor printing processes can be carried out using the printer that has been optimized throughout this work.

## Agradecimentos

Dedico este espaço a todos aqueles que contribuíram para o sucesso e realização desta dissertação. Por representar a última etapa de um longo percurso académico, a todos deixo o mais profundo agradecimento.

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, ao professor Jorge Lino pela oportunidade de realizar a dissertação na área da impressão 3D e por toda a disponibilidade demonstrada para esclarecimento de dúvidas, em termos teóricos e organizacionais. Em suma, por todo o apoio, orientação e conselhos prestados ao longo deste trabalho.

Ao engenheiro Santiago Castellanos, que supervisionou todo o meu trabalho realizado no INEGI, uma palavra de apreço por toda a paciência, palavras de ânimo e dedicação que demonstrou para que me fosse possível realizar um bom trabalho prático.

Aos engenheiros Isaac Ferreira e Leonardo Santana, pela partilha de conhecimentos acerca da impressão 3D e pela disponibilidade que demonstraram em ajudar sempre que necessário.

Aos técnicos Carlos Rocha e José Teixeira, pela ajuda prática que ofereceram sempre que necessitava de realizar processos de soldadura, maquinagem, entre outros. Por último, pela vontade em ajudar sempre que necessitava de material ou ferramentas disponibilizadas pelo INEGI.

Ao João Tiago Abreu, pela partilha de toda a informação relativa ao trabalho realizado durante a sua dissertação, fator fundamental para que fosse possível a otimização da impressora desenvolvida.

À minha mãe, por me ter proporcionado todas as condições para que fosse possível chegar ao nível académico que pretendia e por todo o carinho e paciência demonstrados ao longo deste mesmo caminho. Também agradecer por ter feito com que o meu pai estivesse sempre presente, de uma forma simbólica, em todos os momentos académicos da minha vida.

À minha irmã, por todo o apoio que demonstrou em todos os momentos da realização da dissertação e pela serenidade que transmitiu em alguns momentos mais difíceis.

À minha namorada Ana Chaves, pela paciência, amor e compreensão que demonstrou quando mais necessitava.

Project NORTE-01-0145-FEDER-000022 - SciTech - Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, cofinanced by Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), through Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).



# Índice de Conteúdos

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento e contextualização da dissertação .....	1
1.2	Motivação .....	1
1.3	Objetivos .....	1
1.4	Metodologia .....	1
1.5	Estrutura da dissertação .....	2
2	Estado de Arte .....	3
2.1	Contextualização da Impressão 3D .....	3
2.2	Modelação por extrusão de plástico – FDM .....	4
2.3	Impressora 3D do tipo Delta .....	6
2.3.1	Comparação entre impressoras 3D do tipo Delta e do tipo Cartesiano .....	10
2.4	Softwares de CAM e de controlo da impressão .....	11
2.5	Impressão 3D do tipo FDM em várias cores .....	12
2.5.1	Impressoras 3D Delta do tipo FDM disponíveis no mercado .....	14
2.6	Diamond Extruder .....	15
2.7	Parâmetros de Impressão .....	17
2.8	Materiais .....	19
3	Otimização da impressora 3D do tipo Delta .....	23
3.1	Etapas do trabalho experimental .....	23
3.2	Estudo da impressora 3D para a realização do trabalho .....	23
3.3	Módulo de controlo e comunicação .....	25
3.3.1	Arduino .....	25
3.3.2	Marlin firmware .....	26
3.3.3	Microcontroladores para controlo dos motores de passo .....	29
3.3.4	Suporte do Arduino, da placa RAMPS 1.4 e da placa de extensão .....	29
3.3.5	Organização da base inferior da impressora .....	30
3.4	Módulo estrutural e de movimentação .....	33
3.4.1	Estrutura da impressora .....	33
3.3.2	Ligação direta ao extrusor .....	35
3.5	Módulo da base de impressão .....	38
3.6	Módulo de extrusão .....	41
3.6.1	Unidade de alimentação de filamento .....	42
3.7	Calibração .....	44
3.7.1	Calibração dos microcontroladores dos motores de passo .....	44
3.7.2	Calibração do sistema de movimentação .....	45
3.7.3	Calibração da temperatura da base de impressão e diamond extruder .....	47
3.8	Impressora 3D Delta obtida após modificações .....	48
4	Impressão 3D multicolor .....	50
4.1	Alimentação de filamento .....	50
4.1.1	Problemas relacionados com a alimentação de filamento .....	52

4.2	Método de impressão simultânea de 3 cores.....	54
4.2.1	Mudança de cor associada à alteração da altura de impressão.....	54
4.2.2	Mudança de cor dentro da mesma camada de impressão.....	58
4.3	Peças obtidas através de impressão 3D.....	60
5	Conclusões.....	63
6	Trabalhos futuros .....	65
	Referências .....	66
	ANEXO A: Diagrama de Gantt.....	69
	ANEXO B: Configuração do firmware .....	70
	ANEXO C: Placa para organização das ligações elétricas.....	73
	ANEXO D: Base inferior para fixação da torre dos três eixos .....	74
	ANEXO E: Base superior para fixação das torres dos três eixos .....	75
	ANEXO F: Suporte da cama de impressão .....	76
	ANEXO G: Manual de boas práticas.....	77

## Siglas

3D – Tridimensional

ABS – Acrilonitrilo butadieno estireno

AVR – *Automatic Volume Recognition*

BJ – *Binder Jetting*

CAD – *Computer-Aided Design*

CAM – *Computer-Aided Manufacturing*

CNC – *Computer Numeric Control*

DEMec – Departamento de Engenharia Mecânica

FA – Fabrico Aditivo

FDM – *Fused Deposition Modelling*

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

HIPS – Poliestireno de alta resistência ao impacto

IDE – *Integrated Development Environment*

INEGI – Instituto de Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

LCD – *Liquid Crystal Display*

LDPS – Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços

LED – *Light Emitting Diode*

LOM – *Laminated Object Manufacturing*

NEMA – *National Electric Manufacturers Association*

NTC – *Negative Temperature Coefficient*

PC – Policarbonato

PCB – *Printed Circuit Board*

PET – Politereftalato de Etileno

PID – Proporcional, Integrativo, Derivativo

PLA – Ácido poliláctico

PP – Polipropileno

PTFE – Politetrafluoretileno

PVA – Acetato de polivinilo

PWM – *Pulse Width Modulation*

RAMBo – *RepRap Arduino-compatible Mother Board*

RAMPS – *RepRap Arduino Mega Pololu Shield*



**RepRap** – *Replicating Rapid Prototyper*

**RUMBA** – *Reprap Universal Mega Board with Allegro driver*

**SD** – *Secure Digital*

**SLA** – *Stereolithography*

**SLS** – *Selective Laser Sintering*

**STL** – *Standart Tessellation Language / Standart Triangle Language*

**USB** – *Universal Serial Bus*

**UV** – *Ultravioleta*

## Índice de Figuras

Figura 1 – Impressão 3D, em que o objeto é construído camada a camada [2].	3
Figura 2 – Produção anual de impressoras 3D de baixo custo do tipo FDM (adaptado de [4]).	3
Figura 3 – Esquema representativo da impressão 3D.	4
Figura 4 – Processo de FDM (adaptado de [6]).	5
Figura 5 – Elementos do processo de FDM (adaptado de [8]).	5
Figura 6 – Unidade de alimentação do processo de FDM (adaptado de [9]).	6
Figura 7 - Impressora 3D Big Delta para uso na construção civil [11].	7
Figura 8 – Anatomia de uma impressora 3D do tipo Delta (adaptado de [10]).	7
Figura 9 – Estrutura da impressora 3D em estudo (adaptado de [12]).	8
Figura 10 – Partes constituintes da impressora 3D Delta em estudo [12].	8
Figura 11 - Módulos de uma impressora 3D do tipo Delta.	9
Figura 12 - 1) Alimentador utilizado no topo da impressora; 2) Rolamentos do carril; 3) Fixação da correia no carril; 4) Montagem do extrusor no efetor.	9
Figura 13 – Impressora 3D Cartesiana e Impressora 3D Delta (adaptado de [13]).	10
Figura 14 - Repetier-Host: Visualização da impressão e painel de controlo.	11
Figura 15 - Pronterface: Painel de controlo e envio de comandos em g-code.	12
Figura 16 - Exemplificação do Extrusor Duplo (adaptado de [15]).	12
Figura 17 - Extrusor múltiplo com auxílio de motor para cinco entradas de filamento [9].	13
Figura 18 - Impressão 3D multicolor utilizando o Diamond Extruder [16].	13
Figura 19 - HE 3D K200 DUAL EXTRUDER e pormenor do extrusor duplo (adaptado de [17]).	14
Figura 20 – Impressora 3D Geetech Delta 301 e pormenor do Diamond extruder (adaptado de [18]).	15
Figura 21 – Diamond hotend e respectiva geometria (adaptado de [19]).	15
Figura 22 – Diamond Extruder e respetivos elementos (adaptado de [20]).	16
Figura 23 – Efeitor para incorporação do diamond extruder [12].	16
Figura 24 – Nível de enchimento (adaptado do Software Cura).	17
Figura 25 – Raft, Skirt e Brim [23].	17
Figura 26 – Efeito de empeno numa peça impressa por FDM.	18
Figura 27 – Adição de suportes através da utilização de PVA [25].	18
Figura 28 – Sistema de arrefecimento do extrusor [26].	19
Figura 29 – Volume de Impressão numa impressora 3D do tipo Delta.	19
Figura 30 – Exemplo de bobines de filamento PLA disponíveis comercialmente.	20
Figura 31 - Etapas do trabalho experimental realizado.	23
Figura 32 - Metodologia adotada na otimização da impressora.	23

Figura 33 - Arquitetura da impressora 3D do tipo Delta disponibilizada [12].....	24
Figura 34 - Fonte de alimentação de 12V com uma potência de 360W [34].....	24
Figura 35 - Arduino Mega 2560.....	25
Figura 36 - a) Placa RAMPS 1.4; b) Placa de extensão para um controlador.....	26
Figura 37 - Esquematização das ligações eletrônicas e identificação dos pinos auxiliares para o 3º alimentador.....	27
Figura 38 - Definição do tipo de extrusor: Single Nozzle activo, Mixing extruder desactivo.	28
Figura 39 - Ligação dos pinos da placa de extensão à RAMPS 1.4. ....	28
Figura 40 - Microcontroladores: A) A4988; B) DVR8825. ....	29
Figura 41 - Definição no firmware do número de passos/mm e bits de cada motor de passo.	29
Figura 42 - Organização prévia da parte eletrónica na base inferior da impressora. ....	29
Figura 43 - Suporte desenvolvido para as placas do Arduino, da RAMPS 1.4 e de extensão.	30
Figura 44 – A) Modo de fixação entre os perfis extrudidos; B) Aumento da base inferior da impressora.....	30
Figura 45 - Organização dos componentes eletrónicos.....	31
Figura 46 - Engate de 4 fios elétricos (22 AWG).....	31
Figura 47 - Placa de ligações original. ....	31
Figura 48 - Conceção da nova placa com as ligações elétricas de controlo.....	32
Figura 49 - Placa de controlo da base inferior da impressora modificada. ....	32
Figura 50 - A) Parte inferior a ser maquinada. B) Controlo da máquina através do software MasterCam. ....	33
Figura 51 - Alteração da fixação das torres dos eixos; A) PLA; B) Alumínio.....	34
Figura 52 - A) Estrutura metálica em alumínio. B) Ligações efetuadas até ao topo da estrutura. ....	34
Figura 53 – Fixação da estrutura em alumínio à base inferior da impressora. ....	35
Figura 54 – 1) Base superior da impressora original; 2) Base superior após modificações.....	35
Figura 55 – Anteriores ligações elétricas e do tubo de bowden ao extrusor. ....	36
Figura 56 - Guia das ligações diretas ao diamond extruder. ....	36
Figura 57 - Modo de fixação através da chapa quinada de alumínio. A) vista frontal; B) vista lateral da fixação da guia ao perfil extrudido da base inferior da impressora. ....	37
Figura 58 - Encurvamento da guia das ligações ao extrusor. ....	37
Figura 59 - Pormenor dos engates elétricos em todas as ligações ao extrusor.....	38
Figura 60 - Parafusos de ajuste da base de impressão.....	38
Figura 61 - Estrutura em 4 apoios da base de impressão.....	39
Figura 62 – Elementos da estrutura antiga do suporte da base de impressão.....	39
Figura 63 - 1) Fratura no disco de madeira. 2) Produção de um disco de cortiça. ....	40
Figura 64 - Suporte da base de impressão com 3 apoios.....	41
Figura 65 - Módulo da base de impressão.....	41

Figura 66 - Alimentadores de filamento necessários à impressão.....	42
Figura 67 - Esboço da unidade de alimentação de filamento. ....	42
Figura 68 – A) Suportes de bobine de filamento e respetiva guia; B) Esboço do desenho CAD para impressão. ....	43
Figura 69 - Colocação dos rolamentos nos suportes das bobines de filamento. ....	43
Figura 70 - Unidade de alimentação do filamento concluída. ....	43
Figura 71 - Medição da tensão num drive Pololu DVR8825. ....	44
Figura 72 - Inserção de uma mola na correia. ....	45
Figura 73 - Pontos da base de impressão utilizados na calibração. ....	45
Figura 74 - Ciclo de iteração para calibração do sistema de movimentação. ....	46
Figura 75 - Termopar utilizado para calibração de temperaturas. ....	47
Figura 76 - Impressora obtida depois de efetuadas todas as alterações.....	48
Figura 77 - Realização de uma impressão simultânea de 3 cores. ....	50
Figura 78 - Impressão a uma só cor utilizando o diamond extruder (adaptado de [19]). ....	50
Figura 79 - Esquema para inserção do filamento pronto a ser impresso nas três entradas. ....	51
Figura 80 - Ligação roscada entre o dissipador de calor e o diamond extruder (adaptado de [37]). ....	51
Figura 81 - Vista em corte da mudança efetuada no diâmetro interior da ligação roscada. ....	52
Figura 82 - Fuga de filamento associado às ligações roscadas.....	53
Figura 83 - Medições do comprimento do filamento após alimentação.....	53
Figura 84 - Unidade de ajuste do alimentador de filamento.....	54
Figura 85 - Peça teste para alteração de cor por camada. ....	55
Figura 86 - Divisão do objeto CAD por diferentes ficheiros STL. ....	55
Figura 87 - Utilização do Repetier-Host para definição da cor a ser impressa. ....	55
Figura 88 - Procedimento a efetuar para impressão de uma peça utilizando várias cores de filamento.....	56
Figura 89 - Estatísticas de impressão fornecidas pelo Slic3r. ....	57
Figura 90 - Peça obtida através da alteração de cor por camada. ....	57
Figura 91 - Peça simples para estudo da influência da velocidade de impressão. ....	57
Figura 92 - Peça obtida através da alteração de cor dentro da mesma altura de camada. ....	58
Figura 93 - Triângulo impresso para estudo do comportamento do filamento na mudança de cor na mesma camada. ....	58
Figura 94 - Recipiente impresso.....	60
Figura 95 - Suporte para canetas impresso.....	60
Figura 96 - Suporte para telemóvel impresso.....	61
Figura 97 - Recipiente impresso a uma só cor. ....	62
Figura 98 - Recipiente impresso com alternância de cor.....	62
Figura 99 - Diagrama de Gantt com as etapas da realização da dissertação. ....	69

Figura 100 – Representação esquemática dos pinos da placa RAMPS 1.4 [35].	72
Figura 101 - Desenho técnico da placa para organização das ligações elétricas.	73
Figura 102 - Desenho técnico da base inferior em alumínio.	74
Figura 103 - Desenho técnico da base superior em alumínio.	75
Figura 104 - Desenho técnico do suporte da cama de impressão.	76
Figura 105 – Método de calibração da cama de impressão.	77
Figura 106 - Verificação da temperatura através do firmware.	78
Figura 107 - Associação de ficheiro STL aos diferentes alimentadores.	79
Figura 108 - Alteração manual do filamento a ser extrudido.	79

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Comparação entre uma impressora 3D do tipo Delta e do tipo Cartesiano [10] ....	10
Tabela 2 – Softwares CAM e de controlo de impressão estudados .....	11
Tabela 3 – Principais diferenças entre um extrusor único ou múltiplo .....	14
Tabela 4 – Propriedades do PLA [28] .....	20
Tabela 5 – Filamentos disponíveis para impressão 3D [5].....	21
Tabela 6 – Combinação de ativação de jumpers para a drive A4988.....	44
Tabela 7 – Combinação de ativação de jumpers para a drive DVR8825 .....	44
Tabela 8 – Parâmetros de controlo dos motores de passo .....	45
Tabela 9 – Quadro resumo das melhorias obtidas em cada módulo .....	49
Tabela 10 – Influência de alguns parâmetros na mudança de cor .....	59
Tabela 11 – Datas aproximadas de início e fim da realização de cada etapa .....	69

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento e contextualização da dissertação

A realização da presente dissertação insere-se no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, na especialização de Produção, Conceção e Fabrico.

O objetivo passa pela otimização de uma impressora FDM (*Fused Deposition Modelling* – modelação por extrusão de material) do tipo Delta, para que seja possível a impressão em várias cores ao longo de uma impressão, o que alia o processo tecnológico da impressão 3D ao *design* do objeto impresso. Posteriormente, a impressora será integrada no Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços (LDPS) do DEMec/FEUP, fazendo com que assim exista uma gama mais ampla de impressoras disponíveis neste laboratório.

## 1.2 Motivação

Este projeto tem uma componente prática muito abrangente, desde a reutilização de materiais disponíveis no Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), realização de processos de fabrico como maquinagem, furação e fresagem para obtenção de componentes estruturais para a impressora e programação de *firmware* e *software* necessária à impressão. Com isto, torna-se um projeto que alia várias áreas intrínsecas à Engenharia Mecânica, dado que a impressão 3D tem vindo a desenvolver-se de uma forma exponencial nos últimos anos, sobretudo pela rapidez e facilidade no fabrico de novos produtos.

O facto de ser realizada no INEGI e no LDPS torna o projeto mais aliciente pela disponibilidade dos seus intervenientes e facilidade na utilização dos meios disponibilizados pelos mesmos.

## 1.3 Objetivos

- Otimização de uma impressora 3D do tipo Delta para utilização através do processo de modelação por extrusão de plástico;
- Desenvolvimento para impressão 3D multicolor (duas e três cores).

## 1.4 Metodologia

A metodologia adotada passou pela abordagem prática e teórica à impressão 3D do tipo FDM com a utilização de uma primeira versão da impressora 3D Delta disponibilizada para a realização do trabalho. Esta impressora foi desenvolvida no âmbito de uma dissertação realizada pelo João Tiago Abreu, finalizada em fevereiro de 2017.

De seguida, procedeu-se a um estudo de possíveis melhorias com o objetivo da impressão a várias cores, facilidade de calibração e estabilidade estrutural da impressora.

Com isto, foi possível iniciar de forma prática um conjunto de alterações à impressora que irão ser detalhadas ao longo desta dissertação.

Por fim, testou-se a impressão 3D da impressora desenvolvida, qualidade e facilidade de impressão de vários objetos com duas ou três cores.

## 1.5 Estrutura da dissertação

### 1. Estado de arte e revisão bibliográfica

- Contextualização teórica da impressão 3D, das impressoras do tipo Delta e do processo de FDM. Revisão do funcionamento de uma impressora 3D do tipo Delta e do tipo de extrusor utilizado. Estudo dos materiais utilizáveis, dos parâmetros de impressão e do *Software* CAM.

### 2. Estudo da Impressora 3D do tipo Delta

- Estudo da impressora 3D para a realização do trabalho e das necessidades da máquina para impressão 3D em várias cores. Estudo da viabilidade das alterações a serem introduzidas para otimização e calibração da impressora.

### 3. Implementação de melhorias na impressora 3D

- Alterações efetuadas do ponto de vista estrutural, tendo em conta a facilidade de utilização, e na programação do *firmware* da impressora para utilização adequada do *diamond extruder* fornecido para impressão com três cores.

### 4. Impressões e obtenção de peças com três cores distintas

- Realização de impressões com três cores em simultâneo utilizando variações dos parâmetros de impressão e posterior resolução de problemas relacionados com o tipo de extrusor utilizado e alimentação do filamento.

### 5. Conclusões e trabalhos futuros

- Apreciação global do trabalho desenvolvido, principais conclusões e possíveis sugestões de trabalhos futuros que possam ser realizados através da utilização da impressora otimizada.



## 2 Estado de Arte

### 2.1 Contextualização da Impressão 3D

A Impressão 3D é o termo usado quando se pretende referir processos de Fabrico Aditivo (FA), sendo que este termo engloba um conjunto de processos tecnológicos que permitem produzir modelos físicos tridimensionais diretamente a partir de um modelo CAD, em pouco tempo e de forma autónoma. A característica comum do FA reside no modo como os modelos são construídos, por adição sucessiva de camadas que são construídas umas em cima das outras, de modo a formar um objeto, em contraste com os processos de fabrico de maquinagem, geralmente referidos como subtrativos [1]. A construção do objeto por sucessivas camadas é observável na Figura 1.



Figura 1 – Impressão 3D, em que o objeto é construído camada a camada [2].

O Fabrico Aditivo engloba processos como a estereolitografia (SLA), sinterização por laser (SLS), *Laminate Object Manufacturing* (LOM), *Binder Jetting* (BJ), modelação por extrusão de plástico (FDM), etc. Ao longo da dissertação irá apenas ser abordado o processo FDM [1].

A impressão 3D através do processo de FDM tem tido um aumento exponencial, como é possível verificar na Figura 2. Para isto contribuiu a expiração da patente FDM, por parte da *Stratasys*, o aumento de *softwares open-source* disponíveis e projetos como o *RepRap* e *Fab@home*, cujo objetivo passa por produzir um software gratuito e de código aberto para impressoras 3D. No âmbito deste projeto passou a ser acessível o desenvolvimento de impressoras 3D de baixo custo (impressoras cujo próprio desenvolvimento tem um custo inferior ao custo comercial de uma impressora similar). Ao contrário dos modelos comerciais de máquinas FDM, equipamentos de código aberto tornam-se interessantes para pesquisa, uma vez que apresentam maior flexibilidade e capacidade de adaptação [3].

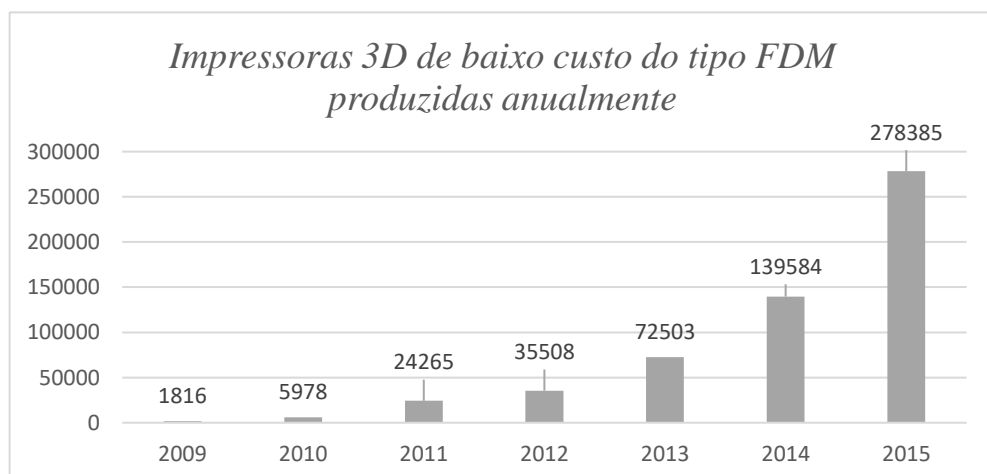


Figura 2 – Produção anual de impressoras 3D de baixo custo do tipo FDM (adaptado de [4]).

A impressão 3D é antecedida por duas fases, a criação do desenho 3D e a obtenção do *g-code* como é possível observar no esquema da Figura 3.

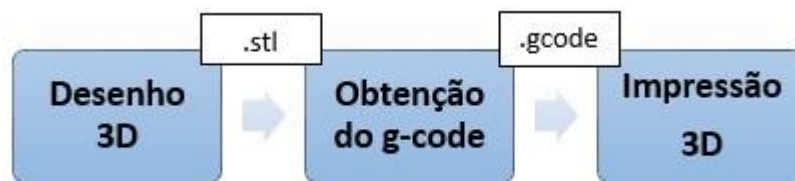


Figura 3 – Esquema representativo da impressão 3D.

A criação de objetos pelo processo de Impressão 3D é realizada através de *softwares* CAD, tais como o *SolidWorks* e *AutoCAD*. De seguida, o ficheiro é exportado no formato STL, que consiste na definição do objeto 3D através de planos triangulares e respetivos vértices.

Para obtenção do *g-code*, o respetivo ficheiro STL é dividido em camadas através do *software* CAM (*Cura*, *Repetier*, *Slic3r*). O *g-code* contém a informação para que a impressora 3D, neste caso do tipo Delta, realize a impressão. Trata-se da programação que comanda as operações de uma máquina através de código CNC. As inúmeras variáveis da impressão 3D, que irão ser abordadas ao longo deste projeto, encontram-se representadas no *g-code*, tais como a velocidade de impressão, o formato da peça, o nível de enchimento e a altura de camada.

Por último, é realizada a impressão. São enviadas as instruções do *g-code* através de um cabo, cartão de memória ou *wi-fi* para a impressora. As instruções enviadas correspondem à impressão completa, sendo possível que a partir deste ponto se controle a impressão diretamente através do *firmware* da impressora ou do *software* CAM caso esteja conectado à impressão em curso [5].

## 2.2 Modelação por extrusão de plástico - FDM

O princípio de funcionamento de fabrico aditivo utilizado pela impressora é a modelação por extrusão de plástico (FDM), em que filamentos de material termoplástico - PLA (Ácido Polilático), ABS (Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno), PC (Policarbonato), entre outros - são extrudidos a partir de um bico de extrusão com o propósito de garantir uma rápida solidificação e endurecimento. É um dos procedimentos de baixo custo mais utilizados na impressão 3D [5].

O material termoplástico, sob a forma de filamento, é alimentado através de uma bobine. O bico extrusor deposita filamentos de material sobre uma base, formando a primeira camada do componente. Esta mesma base é mantida a uma temperatura inferior à do material extrudido, para que este mesmo material solidifique rapidamente. Esta primeira camada tem uma elevada importância na qualidade final do objeto impresso, dado que é a única em que o material não adere a uma camada de material já impressa. O processo descrito é observável na Figura 4.

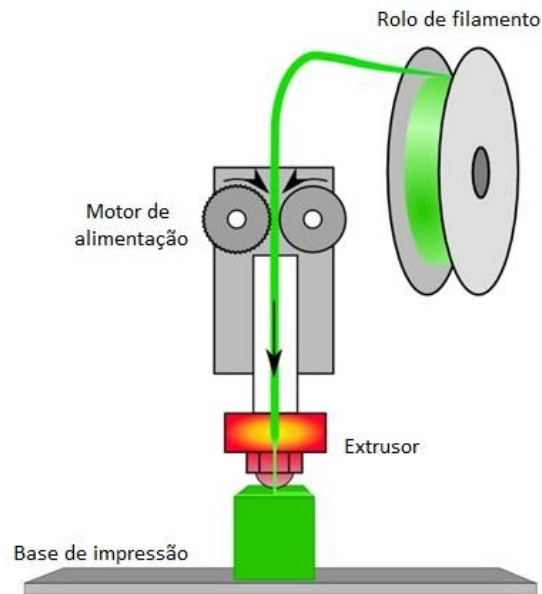


Figura 4 – Processo de FDM (adaptado de [6]).

Após a deposição da primeira camada, o processo é repetido até que o objeto esteja totalmente impresso. A facilidade de adesão entre as camadas é um dos fatores que faz com que a solidificação das camadas subsequentes ocorra de uma forma controlada.

Como particularidade deste processo é possível que a impressão ocorra utilizando vários materiais, isto torna-se essencial em situações em que é preciso um material para suportar o objeto em algumas partes durante a sua impressão. Uma das soluções passaria pela utilização de Álcool Polivinílico (PVA), visto que este é solúvel na água. Com a inserção do modelo final impresso na água, a remoção deste material de suporte ocorreria facilmente, uma vez que o PVA iria ter mais afinidade com a água do que com o outro material utilizado na impressão [7].

O FDM tem a vantagem de permitir o uso simultâneo de dois materiais compatíveis entre si, como se observa na Figura 5. Como desvantagem, o FDM apresenta-se como um dos processos mais lentos, devido à forma do filamento utilizado.

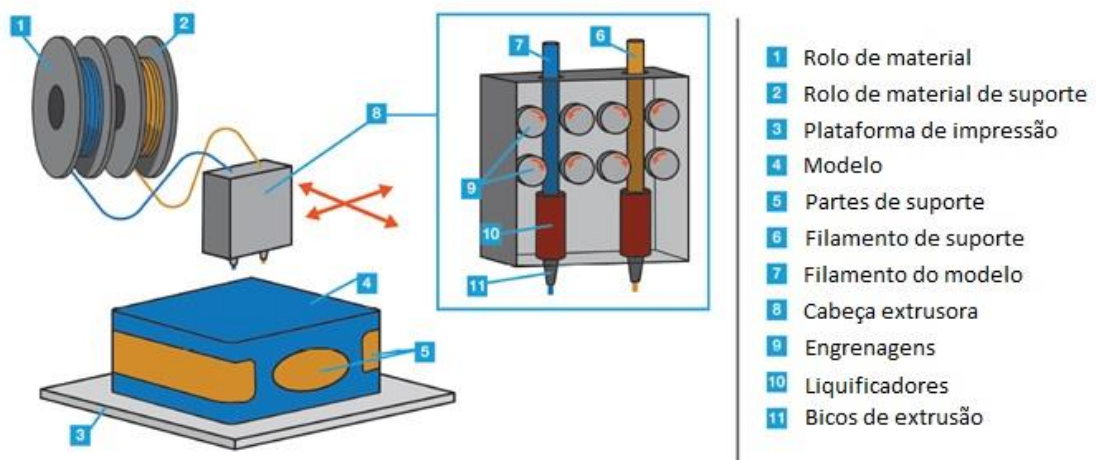


Figura 5 – Elementos do processo de FDM (adaptado de [8]).

A alimentação do material e consequente extrusão do mesmo tem que estar associada para que ocorra uma impressão 3D controlada. Esta unidade de alimentação é composta por alimentador com uma engrenagem condutora do material, que se encontra associada a um motor

de passo. A velocidade de rotação desta mesma engrenagem define a velocidade com que o filamento é conduzido até ao extrusor para ser fundido e impresso. Um fator relevante para o bom funcionamento desta mesma unidade de alimentação é um controlo regular dos resíduos do filamento que ficam entre os dentes da engrenagem durante a impressão, podendo fazer com que o filamento deslize ao invés de ser conduzido a uma velocidade controlada, como pode ser observado na Figura 6 [9].

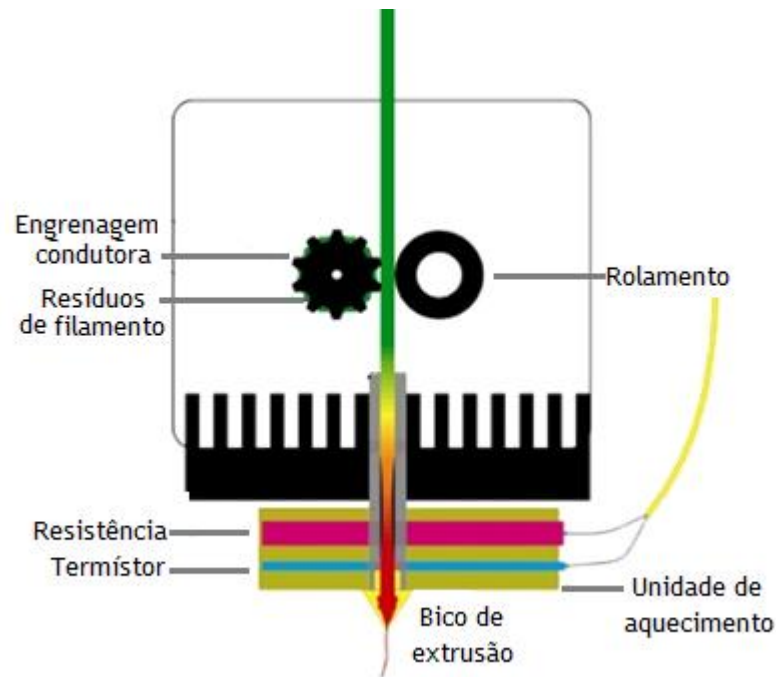


Figura 6 – Unidade de alimentação do processo de FDM (adaptado de [9]).

## 2.3 Impressora 3D do tipo Delta

As impressoras 3D do tipo Delta apresentam três atuadores lineares dispostos verticalmente à volta de um círculo. Ao contrário das impressoras 3D com *design* cartesiano, em que os atuadores lineares estão paralelos a cada um dos três planos ortogonais. Através do controlo dos carris é possível enviar o bico extrusor para qualquer ponto do volume de impressão [10].

As impressoras delta têm vindo a ser alvo de um maior interesse dos fabricantes de impressoras 3D de baixo custo pelas suas características de funcionamento, nomeadamente as suas velocidades de operação e precisão de posicionamento.

De referir que a possibilidade de atingir alturas de impressão elevadas despertou o interesse deste tipo de impressoras para áreas como a engenharia civil e a arquitetura. Este mesmo tipo de impressora é observável na Figura 7. Numa fase posterior, será apresentada uma análise aos principais tipos de impressoras 3D do tipo Delta existentes no mercado, com o objetivo de obter impressões com várias cores.



Figura 7 - Impressora 3D *Big Delta* para uso na construção civil [11].

A translação é realizada verticalmente por três carris, sendo fácil aumentar a altura de trabalho através do aumento do curso ao longo destas torres. Estas torres verticais estão dispostas numa configuração triangular. Para o efetor se mover no plano XY, é necessária a sincronização dos movimentos dos três carris. Para que o efetor translade verticalmente, o movimento dos carris deve ser igual. Para que compreenda melhor o modo de movimentação de uma impressora deste tipo, pode-se observar disposição dos componentes referidos na Figura 8.

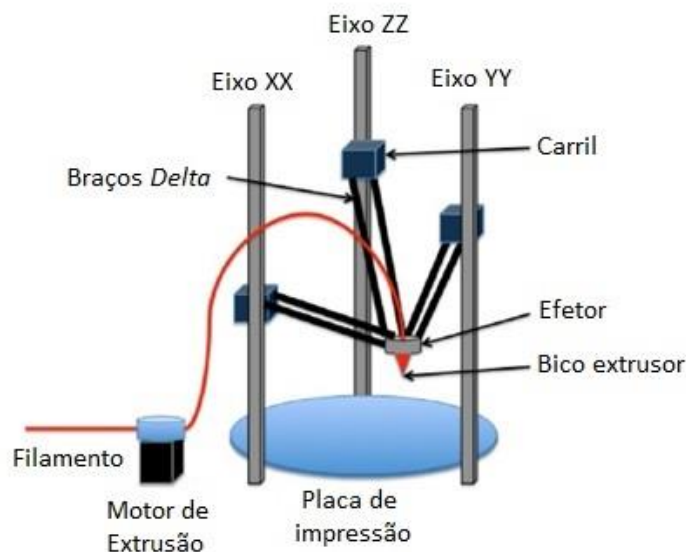


Figura 8 – Anatomia de uma impressora 3D do tipo Delta (adaptado de [10]).

Para que ocorra uma impressão 3D multicolor nas condições ótimas, a calibração da impressora, o suporte dos rolos do filamento e a localização dos alimentadores assumem um papel preponderante. Além destes fatores, será necessária uma análise dos diferentes *softwares* disponíveis para este mesmo objetivo de impressão e um estudo minucioso do extrusor utilizado.

No início da realização do trabalho prático, a impressora existente no LDPS possuía apenas um alimentador, como é possível observar na Figura 9. Como já referido, esta impressora foi desenvolvida ao longo de uma dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da FEUP [12].



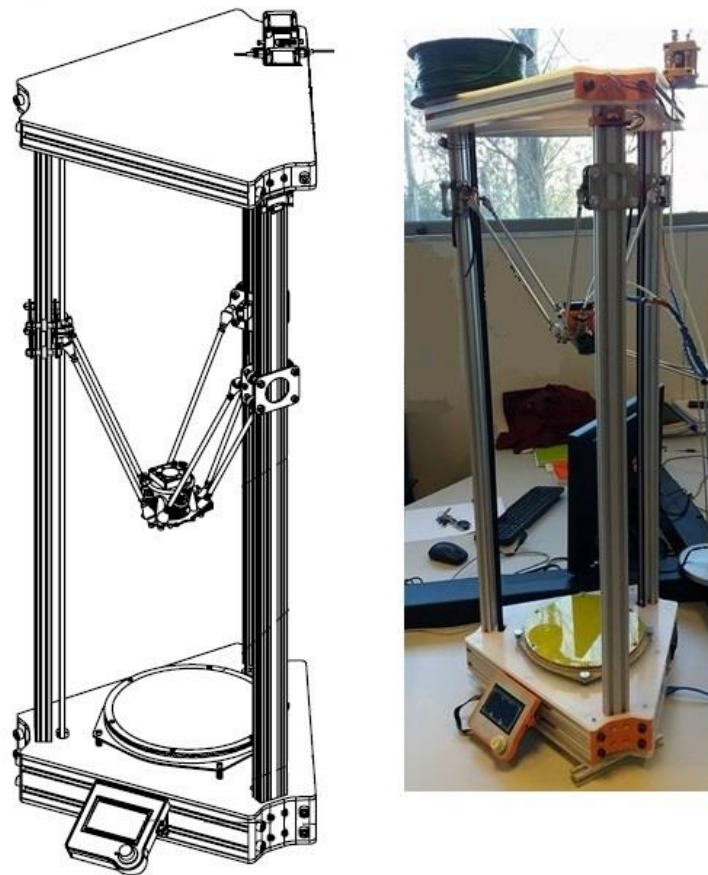


Figura 9 – Estrutura da impressora 3D em estudo (adaptado de [12]).

Quanto à impressora 3D disponibilizada para a realização da dissertação constata-se que é composta por vários componentes que estão ilustrados na Figura 10.

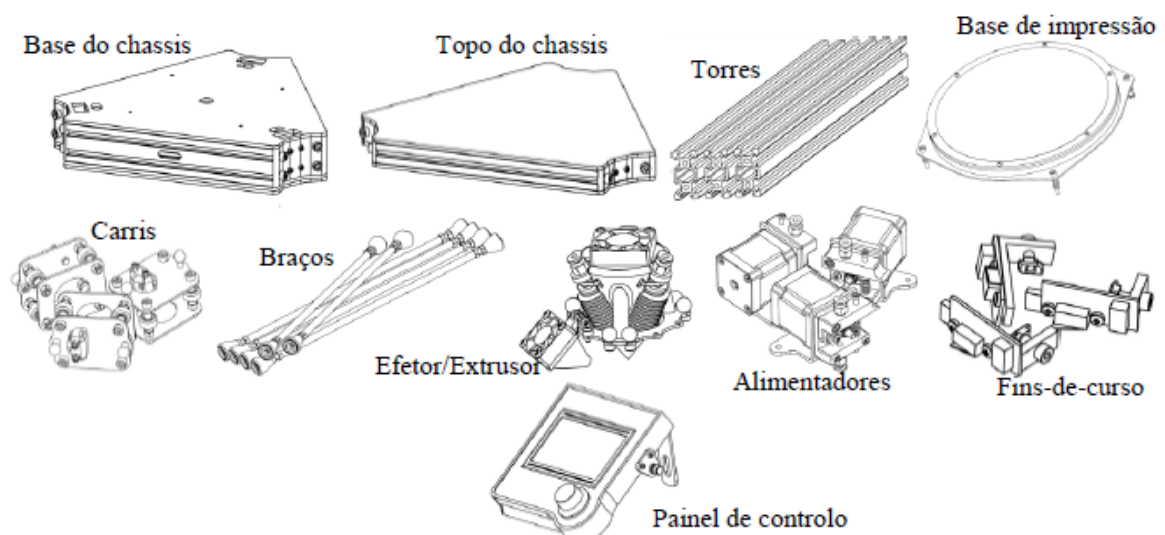


Figura 10 – Partes constituintes da impressora 3D Delta em estudo [12].

Uma impressora 3D pode ser definida por módulos, como se constata no esquema da Figura 11. Os componentes mencionados previamente podem ser divididos pelos diferentes

módulos. Durante a implementação de melhorias na impressora disponibilizada, será apresentado um esquema com as relações intrínsecas destes módulos para uma melhor percepção das alterações efetuadas.

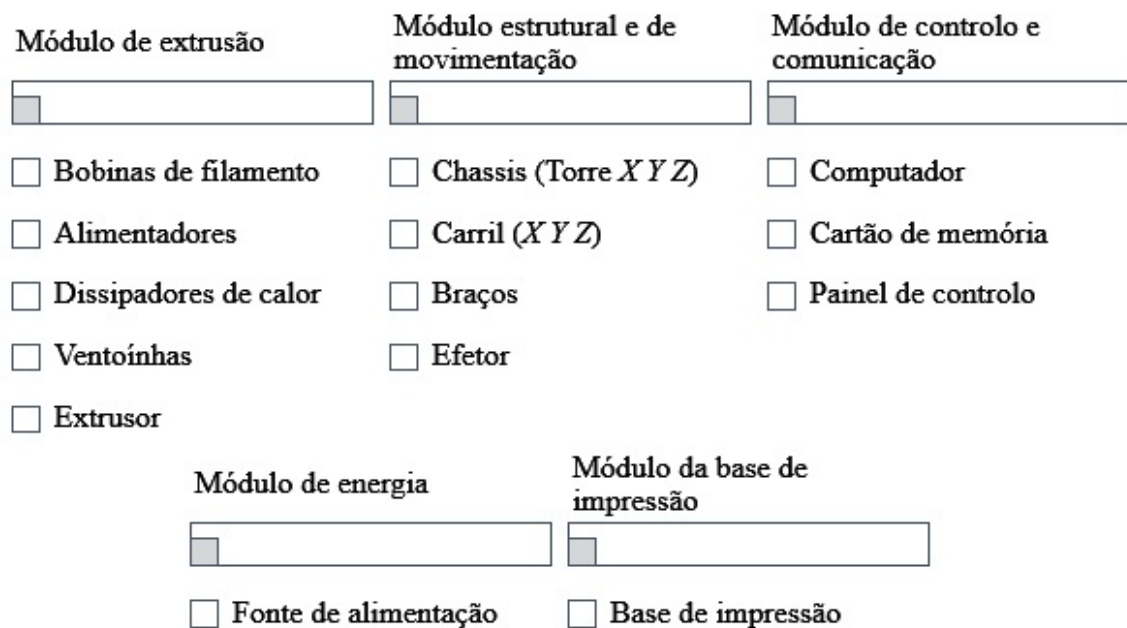


Figura 11 - Módulos de uma impressora 3D do tipo Delta.

É possível demonstrar desde logo alguns dos pormenores da impressora desenvolvida. Alguns destes pormenores são relevantes para entender o funcionamento da mesma, visto que há diversas formas de utilizar alguns dos constituintes de cada módulo referidos na Figura 11. São destacados na Figura 12 quatro destes elementos.

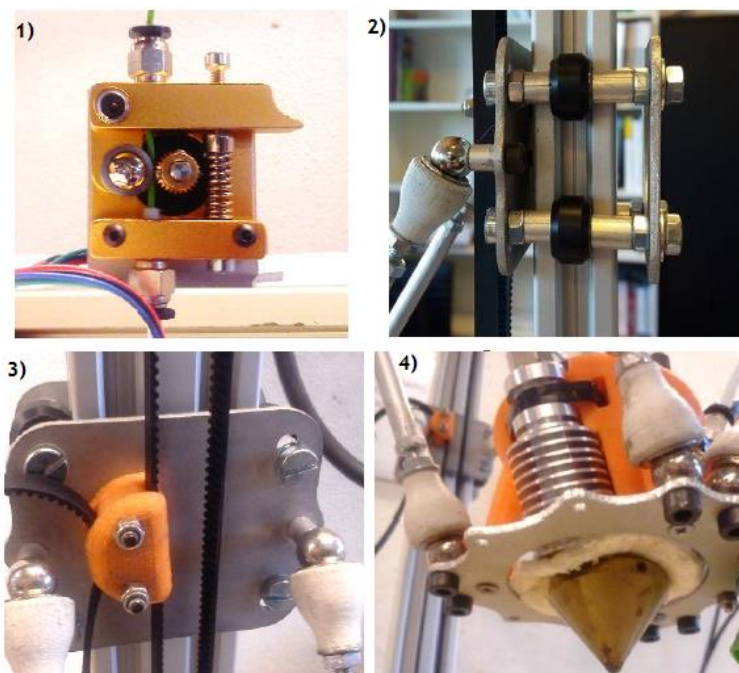


Figura 12 - 1) Alimentador utilizado no topo da impressora; 2) Rolamentos do carril; 3) Fixação da correia no carril; 4) Montagem do extrusor no efetor.

### 2.3.1 Comparação entre impressoras 3D do tipo Delta e do tipo Cartesiano

O outro tipo mais comum de impressoras 3D disponíveis comercialmente são as impressoras 3D do tipo cartesiano. A grande diferença reside no modo como os eixos se movimentam, sendo que isso afeta a estrutura total da impressora e o modo como a impressão é controlada [10]. É possível constatar estas diferenças com uma análise à Figura 13.

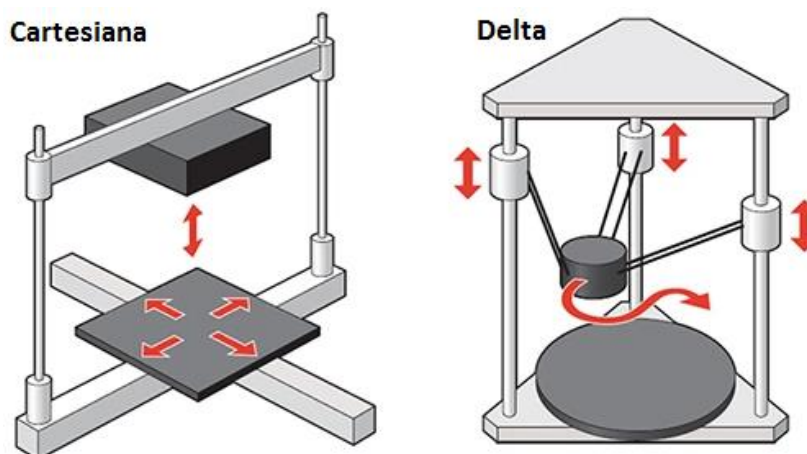


Figura 13 – Impressora 3D Cartesiana e Impressora 3D Delta (adaptado de [13]).

Com isto, torna-se possível comparar alguns dos aspectos que diferem entre os dois tipos mais comuns de impressoras 3D. Estas comparações encontram-se indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre uma impressora 3D do tipo Delta e do tipo Cartesiano [10]

	<b>Delta</b>	<b>Cartesiana</b>
<b>Área de impressão</b>	Circular	Retangular
<b>Altura de impressão</b>	Mais elevada devido à orientação vertical de todos os eixos, permitindo uma maior precisão durante a impressão.	
<b>Movimento dos eixos</b>	Movimentação dos 3 eixos simultânea para definir uma posição.	Movimentação dos eixos independentes não afetando a resolução dos outros eixos.
<b>Rapidez de impressão</b>	Mais rápida devido à harmonia existente entre os 3 eixos, ao contrário dos movimentos independentes de uma impressora 3D cartesiana.	



## 2.4 Softwares de CAM e de controlo da impressão

Os parâmetros de impressão são controláveis através do *software* CAM ou de controlo de impressão. É possível constatar uma grande diversidade de *softwares* CAM, sendo que os mais atrativos acabam por ser os que são distribuídos gratuitamente. Será dado ênfase apenas a este tipo de *software* concebido especificamente para ser usado na impressão 3D. Quanto ao processo de FDM, muitos dos programas são denominados *slicers*, pelo facto de realizarem a divisão do sólido em “fatias” para posterior impressão camada a camada.

Como já referido, é nesta etapa do processo que este *software* cria o ficheiro em *g-code* que contém todos os parâmetros e instruções de impressão, pronto para ser interpretado pela impressora. A linguagem utilizada assemelha-se em muito aos equipamentos CNC, sendo que está adaptado em vários aspetos especificamente para as impressoras 3D.

É possível a conexão de dados, daí a possibilidade de controlo da impressão no computador ao invés do controlo direto através do *firmware* da impressora. Na Figura 14, é possível observar-se o painel de controlo do *Repetier-Host* durante a realização de uma impressão.

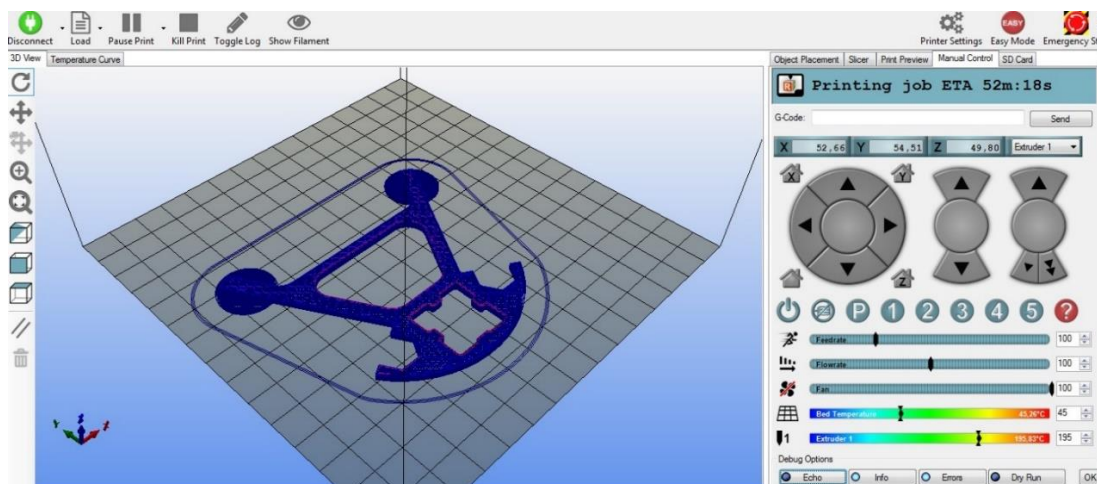


Figura 14 - *Repetier-Host*: Visualização da impressão e painel de controlo.

Encontram-se representados na Tabela 2, os softwares CAM que foram alvo de estudo e utilização ao longo da realização da dissertação.

Tabela 2 – *Softwares* CAM e de controlo de impressão estudados

<i>Software</i>	CAM	Controlo	Acesso
Cura	■✓	■✗	Livre
Repetier-Host	■✓	■✓	Livre
Slic3r	■✓	■✗	Livre
Simplify 3D	■✓	■✓	Pago
Pronterface	■✗	■✓	Livre
CraftWare	■✓	■✓	Livre
Octoprint	■✓	■✓	Pago

De referir que o *Pronterface* é utilizado com o intuito de enviar diretamente comandos em *g-code*, tanto para modificação do *firmware* da impressora como para controlo da impressão. Este tipo de *software* é de elevada importância para a calibração da impressora dado que permite enviar o extrusor para qualquer ponto do volume de impressão e realizar a sua compensação de fim-de-curso. O painel de controlo do *Pronterface* observa-se na Figura 15.

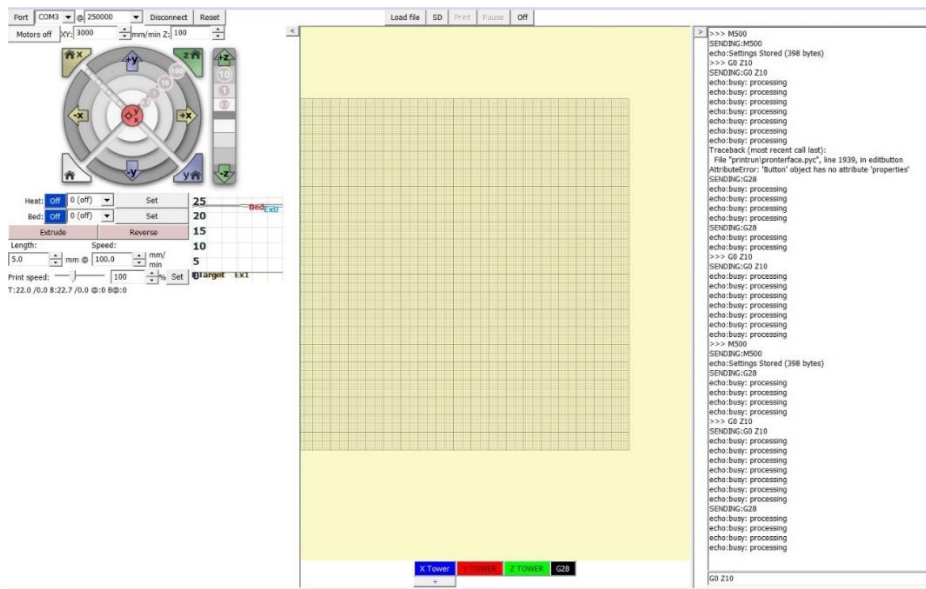


Figura 15 - *Pronterface*: Painel de controlo e envio de comandos em *g-code*.

## 2.5 Impressão 3D do tipo FDM em várias cores

A impressão 3D simultânea em várias cores é possível através da utilização de múltiplos bicos extrusores ou através da utilização do *Diamond Extruder*, que será descrito posteriormente.

Quanto à utilização de múltiplos bicos extrusores, por exemplo o duplo extrusor como é possível observar na Figura 16, permite a impressão de duas cores. Com a regulação independente da temperatura de cada bico de extrusão é possível a extrusão de dois tipos de material na mesma impressão, ou seja, tanto podem ser impressas duas cores do mesmo tipo de material ou de diferentes materiais. Este tipo de extrusor é muito utilizado quando são necessários materiais de suporte devido à geometria complexa do objeto pretendido [14].

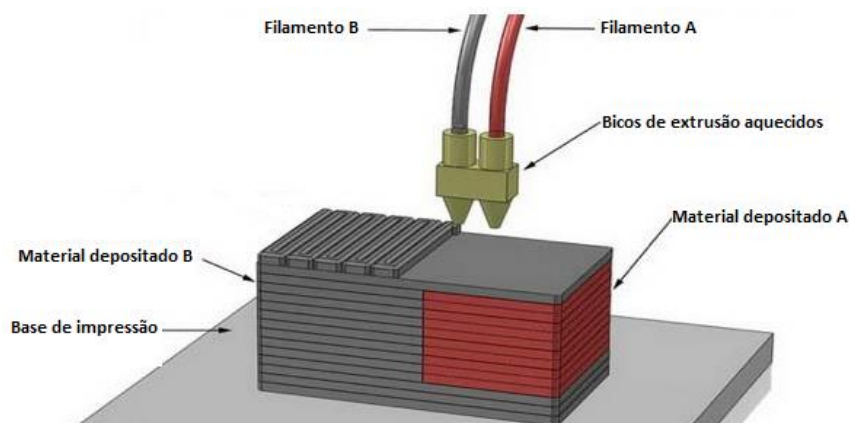


Figura 16 - Exemplificação do Extrusor Duplo (adaptado de [15]).

Para uma gama mais ampla de cores disponíveis para impressão foram desenvolvidos diversos sistemas envolvendo bicos de extrusão múltiplos. Já é possível a utilização de cinco cores ou materiais diferentes numa impressão 3D pelo processo FDM, com base num sistema de alimentação com auxílio de motores, tal como é possível observar na Figura 17.

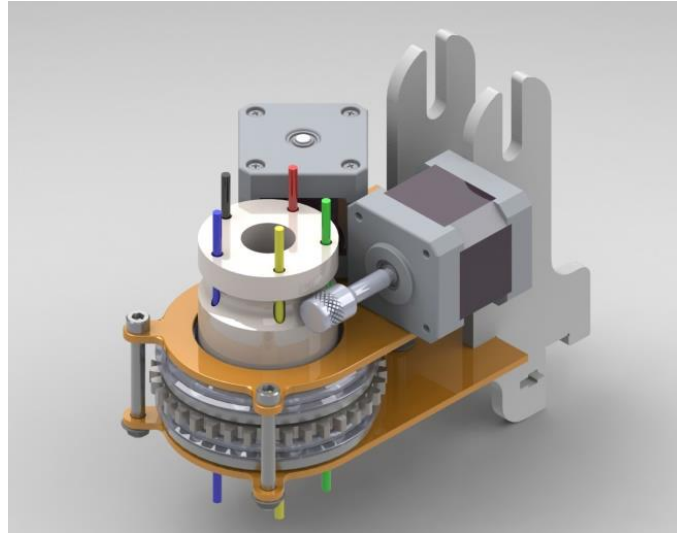


Figura 17 - Extrusor múltiplo com auxílio de motor para cinco entradas de filamento [9].

Quanto à utilização do *diamond extruder* para impressão em várias cores, a principal limitação prende-se com o facto de apenas ser possível a utilização de um tipo de material para cada impressão devido ao facto de a temperatura de extrusão ser igual para as três entradas de filamento, como é possível observar pela geometria deste mesmo tipo de extrusor na Figura 18. Para uma impressão multicolor com o mesmo tipo de material, não oferece nenhum tipo de obstáculo, sendo necessário controlar uma temperatura de extrusão. As vantagens deste tipo de *design* são a facilidade de calibração, a melhor precisão dos diferentes filamentos devido ao bico extrusor único, o facto de permitir gradientes de cor no bico extrusor e de haver pouco desperdício de material [16].

A descrição do diamond extruder será detalhada posteriormente, para que se seja possível a compreensão das referidas limitações e vantagens.



Figura 18 - Impressão 3D multicolor utilizando o Diamond Extruder [16].

Em suma, na Tabela 3, apresentam-se as principais vantagens e desvantagens de cada tipo de extrusor.

Tabela 3 – Principais diferenças entre um extrusor único ou múltiplo

<b>Tipo de extrusor</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Único</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mudança de filamento de impressão ocorre de forma simplificada, não sendo necessária limpeza dos bicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>O aquecimento e controlo de vários bicos extrusores implica mais energia despendida durante o processo de aquecimento e menor precisão.</li> </ul>
<b><i>Diamond Extruder</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Possibilidade de misturar material em diferentes proporções, obtendo modelos com várias cores ou gradientes de cor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Necessário ciclos de retração do filamento durante a mudança de filamento, para evitar mistura dos mesmos.</li> </ul>

### 2.5.1 Impressoras 3D Delta do tipo FDM disponíveis no mercado

Através da realização de um estudo de mercado, foi possível constatar a existência de uma grande variedade de impressoras 3D Delta para impressão a várias cores, que utilizam o processo de FDM, disponíveis comercialmente, com vários extrusores únicos ou com o *diamond extruder*.

Como exemplo do primeiro tipo de impressora referido anteriormente, temos a *HE 3D K200 DUAL EXTRUDER*, como é possível observar na Figura 19. É possível a impressão a uma ou duas cores [17].

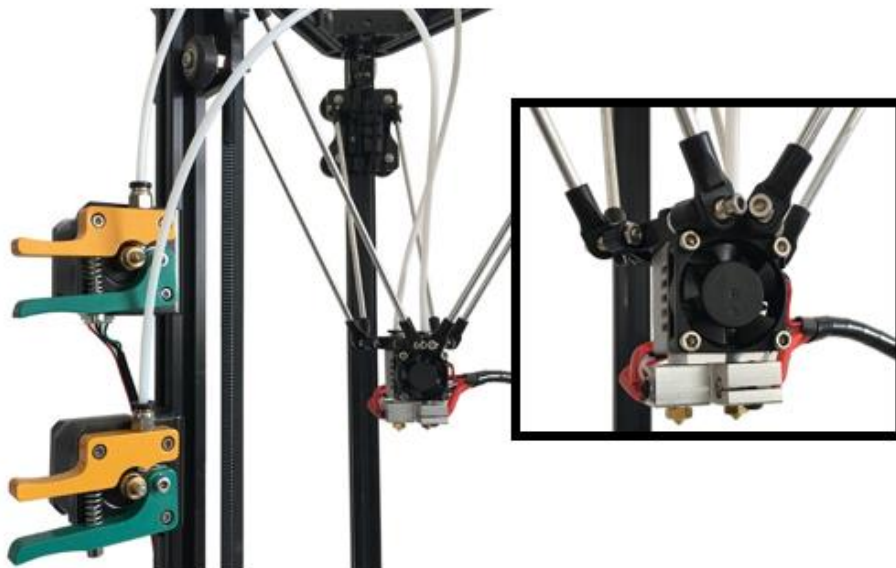


Figura 19 - *HE 3D K200 DUAL EXTRUDER* e pormenor do extrusor duplo (adaptado de [17]).



Na utilização de um extrusor para múltiplas entradas de filamento, pode-se referir a impressora 3D *Geetech Delta 301*, em que é possível a impressão até três cores através da utilização de um *diamond extruder*, como é possível observar em detalhe na Figura 20 [18].

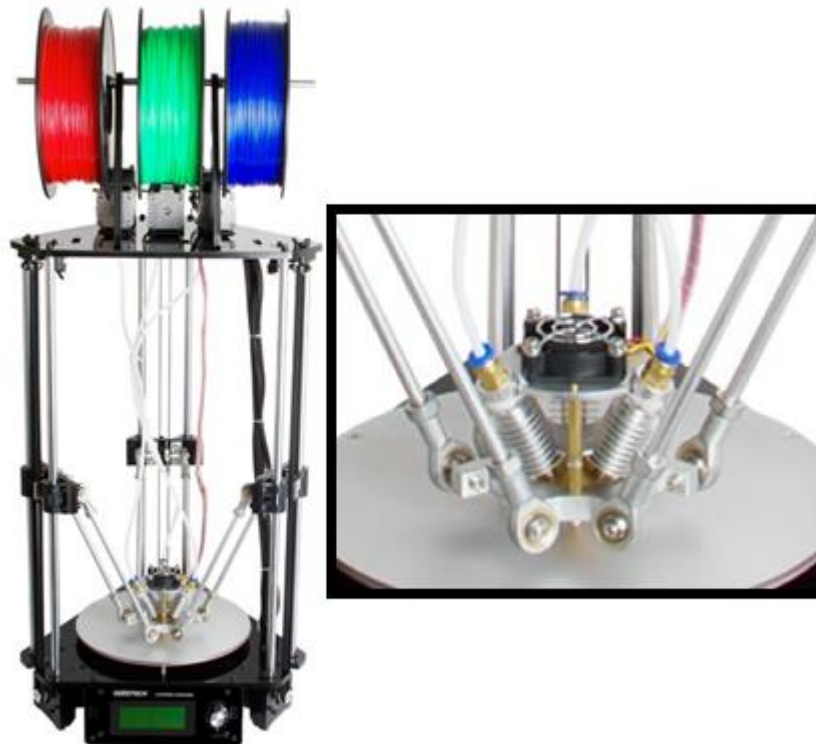


Figura 20 – Impressora 3D *Geetech Delta 301* e pormenor do *Diamond extruder* (adaptado de [18]).

Durante a realização prática da dissertação, como será especificado adiante, a utilização do *diamond extruder* foi selecionada tendo em conta o objetivo da impressão multicolor.

## 2.6 Diamond Extruder

A impressora possui um extrusor denominado *diamond extruder*. A particularidade deste extrusor passa pela possibilidade de realizar a impressão de três cores diferentes, pelo facto de possuir três entradas que permitem a alimentação de três filamentos. Como possui apenas um orifício para extrudir o material, sendo possível misturar diferentes filamentos e alterar o filamento a imprimir de uma forma rápida e eficiente caso se pretenda um gradiente. Se o pretendido for a impressão de várias cores com mudança bem definida, será necessária a retração do filamento a ser substituído. Está associado a uma fácil calibração e é mais preciso do que impressões através de vários bicos extrusores em simultâneo. Este extrusor é o único do seu tipo disponível no mercado [19]. O aspecto e respectiva geometria do Diamond extruder encontra-se representada na Figura 21.

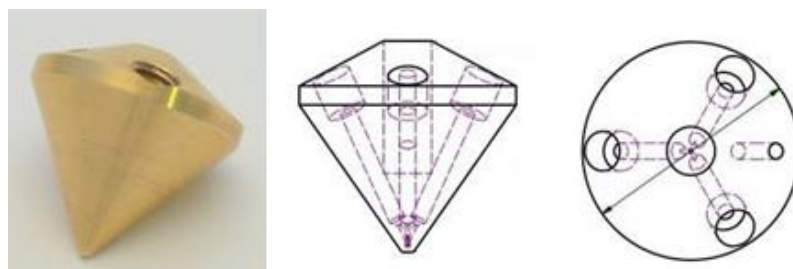


Figura 21 – *Diamond hotend* e respectiva geometria (adaptado de [19]).

De referir que a estrutura de arrefecimento funciona através de convecção forçada, em função de uma ventoinha, para consequente arrefecimento dos dissipadores de calor. O bico extrusor possui três dissipadores de calor, como é possível observar na Figura 22, que possibilitam que o filamento esteja sólido quando entra no bico aquecido. Isto evita que a extrusão ocorra previamente, provocando um défice no fluxo de material que é extrudido ou até mesmo o seu entupimento [20].



Figura 22 – Diamond Extruder e respetivos elementos (adaptado de [20])

O extrusor disponível para uso está ainda associado a um efetor que permite a ligação aos braços da impressora. Este mesmo efetor está equipado com rótulas magnéticas que permitem a ligação e movimentação dos braços da impressora [12]. O desenho esquemático do efetor juntamente com as rótulas magnéticas encontra-se representado na Figura 23.

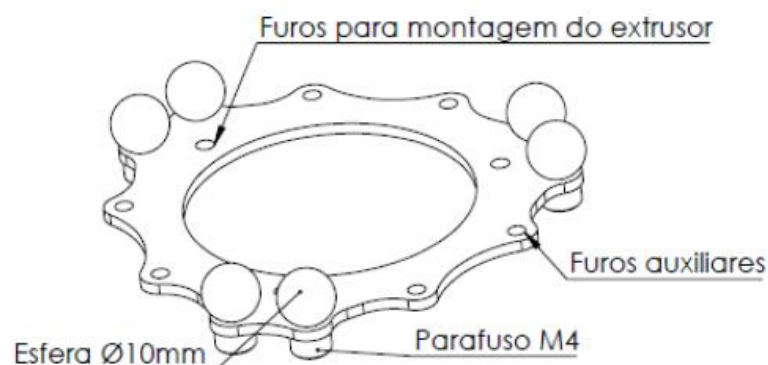


Figura 23 – Efetor para incorporação do diamond extruder [12].

Os restantes elementos do módulo de extrusão são o alimentador e o tubo de *Bowden* que tem como função guiar o filamento da bobina até ao extrusor. O tubo de *Bowden* é feito de PTFE devido ao baixo atrito superficial e resistência a temperaturas elevadas.

## 2.7 Parâmetros de Impressão

Os parâmetros de impressão estão relacionados com o controlo e qualidade do objeto impresso. Estes mesmos parâmetros são definidos através do *software* CAM ou diretamente através do *firmware* da impressora. Dependendo dos *softwares* utilizados, apesar de definidos inicialmente, alguns parâmetros podem ser alterados durante a impressão do objeto.

Deve ser indicado o material a ser extrudido, o volume disponível para impressão e a altura de camada. O volume disponível para impressão está relacionado com as dimensões físicas da impressora. A altura de camada influencia a qualidade de impressão, dado que quanto maior a altura de camada, menor a definição do objeto impresso e o tempo total de impressão. Normalmente é utilizado um valor próximo de 0.1 mm [21].

O nível de enchimento define a forma como o material será impresso dentro da superfície interior do objeto impresso. Este afeta o tempo total de impressão, material despendido e a qualidade estrutural da peça final. Tendo em conta a impressão de um cubo, o nível de enchimento encontra-se representado na Figura 24.

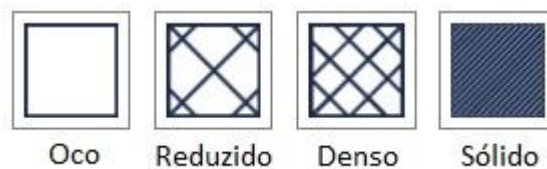


Figura 24 – Nível de enchimento (adaptado do *Software Cura*).

Quanto aos parâmetros relacionados com o material, define-se as temperaturas de extrusão e da base adequadas ao material selecionado. Deve ser indicado o diâmetro do filamento, sendo que se encontram disponíveis comercialmente os diâmetros 1,75 mm e 3 mm. Este diâmetro deve ser verificado, porque pode apresentar um valor diferente do indicado pelo fornecedor, sendo necessário indicar o diâmetro exato do filamento para uma melhor qualidade de impressão. Por fim, existe a possibilidade de regular a compensação do fluxo de material extrudido.

A velocidade de impressão deve ser arbitrada, podendo variar entre 20 e 80 mm/s. Esta velocidade de impressão deve ter o mesmo valor da velocidade com que o filamento é alimentado para que não exista défice nem excesso de material extrudido durante a impressão. Ainda pode ser definida a velocidade durante a qual não há impressão, ou seja nos movimentos de reposicionamento do bico extrusor, este valor poderá ser mais elevado do que a velocidade de impressão para que seja possível diminuir o tempo total de impressão [22].

Ainda podem ser adicionadas estruturas para ajudar na adesão da primeira camada à superfície de impressão, como o *Skirt*, *Brim* e *Raft*. Estas estruturas, visíveis na Figura 25, são de fácil remoção após impressão [23].

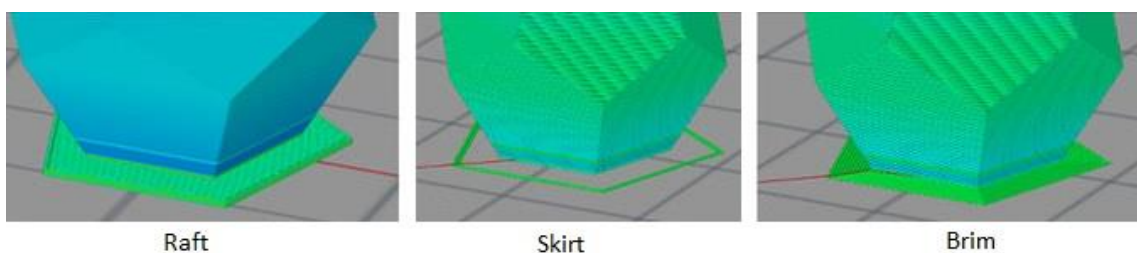


Figura 25 – *Raft*, *Skirt* e *Brim* [23].

O *Raft* adiciona uma estrutura num formato de grelha para suportar o modelo durante a impressão.

O *Skirt* é um conjunto de linhas impressas à volta do modelo, mas não ligadas ao modelo.

O *Brim* adiciona uma só camada numa área plana à volta da base do modelo para prevenir o efeito de empeno. O *Brim*, à semelhança do *Skirt*, garante que o material esteja a extrudir corretamente aquando do início da impressão da peça.

Este efeito de empeno também é prevenido através da utilização de bases de impressão aquecidas, como será referido numa fase posterior, e através da aplicação de colas específicas para vários tipos de materiais a ser impressos [24]. Pode ser observado na Figura 26, o efeito de empeno numa peça após impressão.

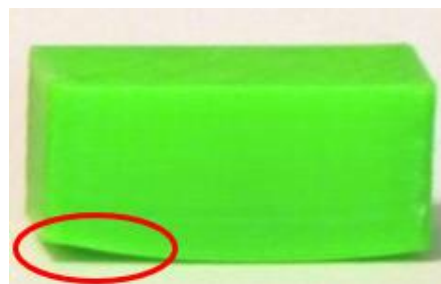


Figura 26 – Efeito de empeno numa peça impressa por FDM.

Poderá ser necessário a adição de suportes ao modelo pretendido consoante a geometria do modelo a ser impresso. Normalmente esta adição de suportes é impressa noutro material, como o PVA, devido à sua fácil remoção quando imerso em água. Este parâmetro não será trabalhado ao longo da realização da dissertação, dado que apenas será utilizado o PLA como referido anteriormente [7]. A remoção do PVA, após ser imersa em água, é observável na Figura 27.



Figura 27 – Adição de suportes através da utilização de PVA [25].

Pode ainda ser definido um sistema de arrefecimento, com o auxílio de ventoinhas, durante a impressão para que o material solidifique de uma forma mais eficiente. Dependendo do material a ser impresso, a necessidade de aplicação de um sistema de arrefecimento no bico extrusor varia de importância. Logo, este parâmetro encontra-se diretamente relacionado com o material e a textura final da peça, ou seja, com a rugosidade e necessidade de acabamento pós-impressão [22]. Pode ser constatado na Figura 28, um exemplo de um sistema de arrefecimento aplicado ao bico extrusor.



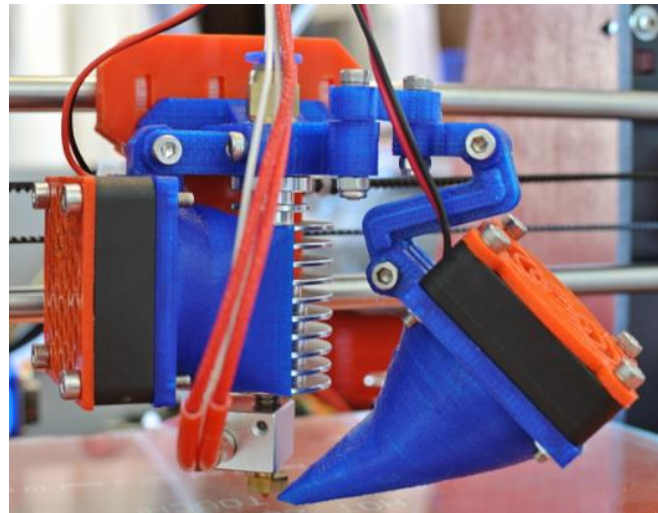


Figura 28 – Sistema de arrefecimento do extrusor [26].

Como parâmetro de impressão pode-se ainda definir o volume disponível de impressão, que é definido com base nas dimensões físicas da impressora. No caso de uma impressora delta, o volume de impressão é um cilindro definido com base nos 3 eixos da impressora. Este parâmetro, visível na Figura 29, só é ajustável através de uma alteração das dimensões físicas da impressora [10].

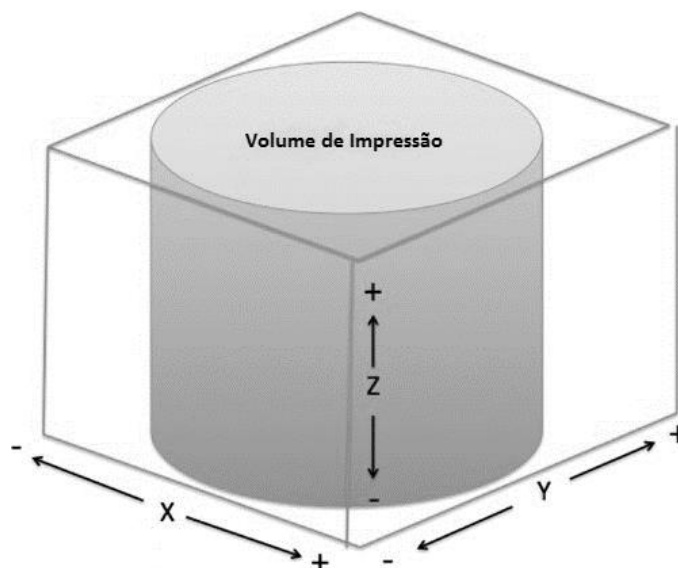


Figura 29 – Volume de Impressão numa impressora 3D do tipo Delta.

## 2.8 Materiais

Os filamentos de material termoplástico que se utilizam nas impressoras 3D do tipo Delta, através de FDM, estão disponíveis comercialmente. O fabricante especifica o tipo de polímero, a temperatura de extrusão, a temperatura da base e o diâmetro do filamento. Os filamentos com diâmetro de 1,75 mm são amplamente utilizados devido à sua facilidade de arrasto em comparação com os de 3 mm. Um menor diâmetro também permite uma maior resolução na impressão do modelo pretendido. A temperatura da base deve ser regulada para facilitar a adesão das primeiras camadas e assim evitar desvios e deformações. Na Figura 30, é possível constatar o formato das bobines de filamento disponíveis comercialmente.



Figura 30 – Exemplo de bobines de filamento PLA disponíveis comercialmente.

O PLA é o filamento plástico mais utilizado para impressão 3D, principalmente nas impressoras de baixo custo. Trata-se de um material termoplástico biodegradável de origem natural, obtido através do amido do milho ou cana-de-açúcar. Esta propriedade, aliada à biocompatibilidade e o facto de constituir um recurso inesgotável, fez com que o PLA tenha sido alvo de uma grande evolução por parte da indústria. Apresenta elevada resistência ao impacto, resistência mecânica, dureza, rigidez e tenacidade [27]. Algumas das propriedades mecânicas do PLA encontram-se representadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades do PLA [28]

Propriedade	Valor (unidade)
Tensão máxima	16 - 72 MPa
Tensão de rotura	14 - 70 MPa
Módulo de <i>Young</i>	310 – 5620 MPa
Extensão	1 – 8,5%
Extensão na rotura	1 – 12 %
Tensão máxima à flexão	9 – 110 MPa
Resistência ao impacto, entalhe <i>Charpy</i>	1,4 – 5,5 kJ/m <sup>2</sup>
Dureza	82 – 88 <i>Rockwell R</i>
Massa volúmica	1,24 – 1,26 g/cm <sup>3</sup>

Como vantagens ao nível da impressão destaca-se o facto de poder ser impresso à temperatura ambiente, velocidade de impressão mais elevada, superfície mais suave, brilhante e com maior detalhe. Existe a necessidade de cobrir a superfície da base de aquecimento com fita *kapton* (composta por PTFE) para que não ocorram problemas de aderência à cama de impressão e na consequente remoção da peça após impressão. Esta fita caracteriza-se pela resistência a altas temperaturas. Contudo, o PLA tem baixa resistência térmica, e começa a

distorcer a sua superfície em contacto com temperaturas mais elevadas. Pode ainda ser referido que não origina odores durante a impressão, tem boa formabilidade aquando da deposição. Por norma o PLA é mais fácil de trabalhar pois não é tão sensível a alterações de temperatura como o ABS [29].

O seu valor comercial ronda os 20 EUR/kg [30].

A temperatura de extrusão está entre os 190°C e 220°C e a temperatura da base aquecida deverá rondar os 60°C [5].

Na realização da dissertação apenas será utilizado o PLA, mas existem outros materiais que poderão vir a ser utilizados numa fase posterior dos quais se destacam o ABS, PVA, Poliestireno de alto impacto (HIPS), Politereftalato de Etileno (PET), PC e Nylon.

Apresentam-se na Tabela 5, os parâmetros de temperatura durante impressão, as superfícies de impressão e os custos de cada material disponível para impressão.

Tabela 5 – Filamentos disponíveis para impressão 3D [5].

Filamento	Temperatura de extrusão (°C)	Temperatura da base (°C)	Superfície de impressão	Custo [30] (EUR/kg)
<b>PLA</b>	<b>190 – 220</b>	<b>20 – 60</b>	<b>Vidro e Kapton</b>	<b>20</b>
ABS	185 – 235	90 – 110	<i>Kapton</i>	20
PVA	180 – 220	50	<i>Kapton</i>	40
HIPS	220 – 235	115	<i>Kapton</i>	25
PET	210 – 220	20-65	Vidro e <i>Kapton</i>	30
PC	280 – 305	85 – 95	<i>Kapton</i>	60
<i>NYLON</i>	225 – 240	Ambiente	<i>Garolite</i>	35

De referir que a *Garolite*, composta por uma resina epoxy reforçada com fibra de vidro, é utilizada pela sua resistência a temperaturas elevadas.

Quanto ao ABS, é o material mais comum depois do PLA. Apresenta propriedades mecânicas similares ao PLA. Além destas propriedades, também se caracteriza pela resistência à abrasão e a produtos químicos. Pode ainda ser facilmente pintado e colado através de adesivos, mas degrada-se com a radiação UV. Ao utilizar-se este material, temos que ter uma câmara controlada de impressão, ou um sistema de ventilação forçada, dado que durante o processo de fusão emite gases nocivos. A grande vantagem do ABS em relação ao PLA passa pelo objeto impresso resistir a temperaturas mais elevadas e pelo facto de permitir a obtenção de peças mais robustas e menos frágeis. Tanto o ABS como o PLA apresentam uma variedade enorme de cores disponíveis comercialmente, o que torna o uso destes materiais muito interessantes a nível estético. [31]

O PVA é um polímero hidrossolúvel em água, e por esse facto utiliza-se na criação de estruturas de suporte para apoio a materiais como o PLA e o ABS em impressoras com duplo extrusor. É usado para suporte de cavidades interiores e para peças intrincadas, onde a remoção manual de material de apoio é difícil [2].

O HIPS é um polímero termoplástico com resistência mecânicas e térmicas similares ao ABS, e apresenta um acabamento muito fino. Como desvantagem apresenta a degradação quando exposto à radiação UV. Da mesma forma que o PVA serve como material de suporte ao PLA, o HIPS tem o mesmo efeito para o ABS devido ao facto de se dissolver com limoneno ( $C_{10}H_{16}$ , é um composto orgânico que pertence à família dos terpenos e é o responsável pelo aroma forte dos citrinos) enquanto que o ABS é insolúvel nesta mesma substância [32].

O PET é um material termoplástico com alto grau de cristalinidade que se caracteriza pela elevada resistência ao desgaste, impacto e corrosão. Depois de realizada a impressão, deve-se refrigerar para que mantenha a transparência característica [5].

O PC é um material termoplástico que apresenta elevada resistência ao impacto, rigidez, transparência e estabilidade dimensional. A sua reciclagem é possível, não sendo biodegradável. A sua utilização como filamento para impressão 3D não é muito comum [5].

O *Nylon* apresenta-se como alternativa ao ABS e ao PLA devido à sua resistência e flexibilidade, sendo uma fibra sintética forte e elástica. Apresenta dificuldades de adesão à plataforma e necessidades de secagem antes do seu uso para evitar que a humidade cause grandes deformações. Só está disponível na sua cor natural, branco [33].

### 3 Otimização da impressora 3D do tipo Delta

#### 3.1 Etapas do trabalho experimental

O presente capítulo e o seguinte apresentam o trabalho experimental realizado ao longo da dissertação. Este trabalho experimental poderá ser dividido em dois tópicos:

- Capítulo 3 – Otimização da impressora 3D;
- Capítulo 4 – Impressão multicolor.

Estas etapas encontram-se representadas na Figura 31.



Figura 31 - Etapas do trabalho experimental realizado.

#### 3.2 Estudo da impressora 3D para a realização do trabalho

Através do manuseamento da impressora 3D fornecida para a realização do trabalho, foram possíveis a impressão de objetos com uma só cor e a familiarização com as impressoras 3D do tipo Delta, *Marlin Firmware* e *softwares CAM*. O objetivo, nesta fase, passa pela otimização da impressora, bem como a adição de alguns componentes tendo em conta a sua melhoria global, com o objetivo final da impressão simultânea a três cores.

A metodologia utilizada encontra-se expressa na Figura 32.

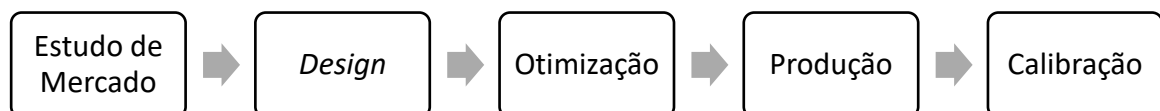


Figura 32 - Metodologia adotada na otimização da impressora.

Foi realizado um estudo da impressora 3D desenvolvida para que fosse possível constatar o estado da impressora. Foi possível imprimir satisfatoriamente objetos de uma só cor, sendo que a primeira camada de impressão apresentava algumas irregularidades devido à dificuldade de nivelção da base de impressão. Com esta utilização da impressora, foi possível um estudo dos parâmetros de impressão que influenciavam a qualidade e o tempo de impressão.

Através da Figura 33, verifica-se a ligação entre os módulos constituintes da impressora 3D do tipo Delta. A partir do esquema, obtêm-se uma melhor percepção de todas as melhorias, em cada módulo, que foram realizadas e que serão apresentadas posteriormente.

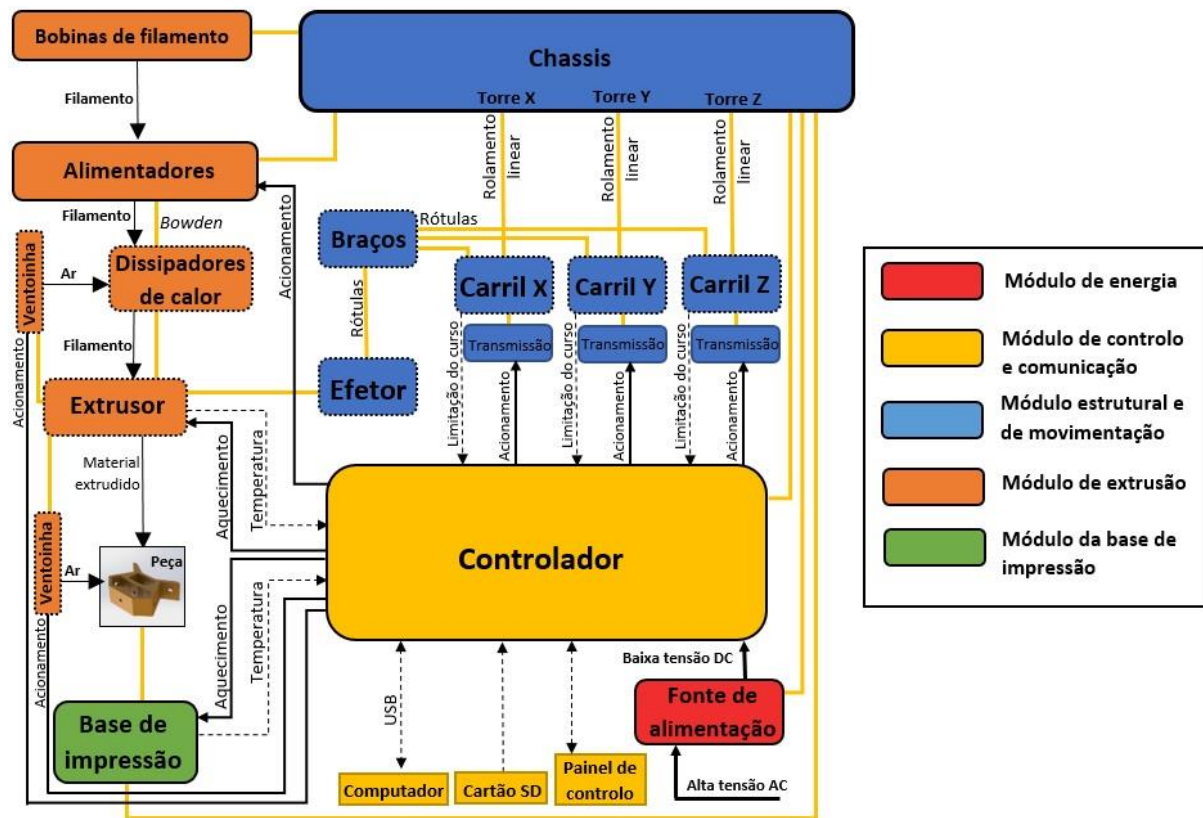


Figura 33 - Arquitetura da impressora 3D do tipo Delta disponibilizada [12].

O único módulo que permaneceu inalterado foi o módulo de energia, uma vez que a fonte de alimentação utilizada permaneceu a mesma. Esta mesma fonte pode ser observada na Figura 34.



Figura 34 - Fonte de alimentação de 12V com uma potência de 360W [34].

Quanto ao módulo de controlo e comunicação, foram efetuadas inúmeras alterações no *firmware* para que seja possível a impressão a três cores. A impressora estava definida para impressões de uma só cor, sendo que o *diamond extruder* estaria a funcionar como um extrusor único para essa mesma entrada de filamento. Foram estudadas as alterações necessárias no *firmware* para que a impressão fosse realizada através de três cores em simultâneo aproveitando as potencialidades do *Diamond Extruder*. Este módulo assume importância pelo facto de ser responsável pelo controlo de todos os outros módulos à exceção do módulo de energia, referido anteriormente.



Em relação ao módulo estrutural e de movimentação, existiu a necessidade de alteração do suporte das torres para uma melhor estabilidade da impressora aquando da impressão, nivelção e calibração. A estrutura de suporte das torres torna a impressora mais precisa caso se utilizem peças maquinadas em alumínio ao invés de peças em PLA impressas através do processo de FDM, como será referido posteriormente. Este módulo assume o papel principal no que à precisão da impressão diz respeito aliado à calibração do sistema de movimentação.

No módulo de extrusão foi realizado um estudo de mercado sobre o modo como seriam suportadas as bobinas de filamento, para posterior alimentação dos três filamentos ao *Diamond Extruder*. Com isto foi necessário estudar uma forma de implementar os três alimentadores, de forma a conciliar estes com as bobines de filamento. O posicionamento da unidade de alimentação de filamento influencia a facilidade com que o utilizador consegue substituir/alterar bobines de filamento.

Por último, optou-se pela alteração da base de impressão para obtenção de uma melhor facilidade de nivelção e por motivos de dissipação do calor a que esta mesma base é sujeita.

### 3.3 Módulo de controlo e comunicação

#### 3.3.1 Arduino

O Arduino consiste numa placa de prototipagem eletrónica baseada em microcontroladores AVR da companhia *Atmel*, observável na Figura 35. O Arduino permite que a programação de microcontroladores se torne acessível com base numa programação realizada através do *Marlin Firmware* ou *Repetier Firmware*. Insere-se no movimento *open-source*, em que existe uma grande partilha de programações por parte dos utilizadores, e por isso tornaram-se numa boa opção para o controlo de impressoras 3D de baixo custo. O modelo Arduino Mega 2560 foi o selecionado por possuir um número elevado de pinos e um poder de processamento suficiente.

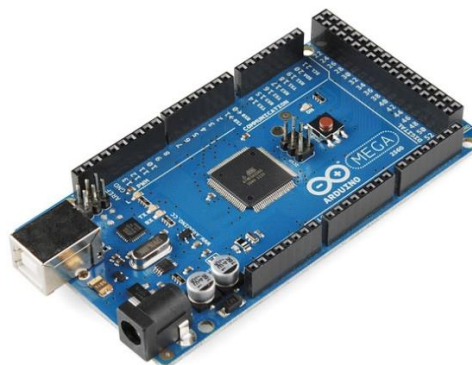


Figura 35 - Arduino Mega 2560.

Foram desenvolvidas várias placas de expansão como a RAMPS (*RepRap Arduino Mega Pololu Shield*) e placas baseadas no Arduino Mega, como a RAMBo (*RepRap Arduino Compatible Board*) ou a RUMBA (*RepRap Universal Mega Board with Allegro driver*). Com isto, é possível constatar que existe uma grande variedade de placas que diferem, por exemplo, em relação ao seu poder de processamento, memória, número de pinos e número de controladores [35]. A programação destas placas é feita a partir de um *software*, chamado Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) que é disponibilizado gratuitamente.

A placa utilizada foi a RAMPS 1.4, devido ao seu baixo custo, apesar da placa apenas possuir capacidade para cinco controladores, logo foi necessária a utilização de uma placa de extensão (*keyes stepper motor*) para que fosse possível o aumento da capacidade em mais um controlador. Estes seis controladores consistem nos motores de passo para os três eixos (X, Y, Z) e para os três alimentadores. Sem a adição da placa de extensão apenas seria possível o controlo de dois alimentadores, fazendo com que o diamond extruder ficasse com uma entrada sem fornecimento de filamento. As placas utilizadas podem ser observadas na Figura 36.

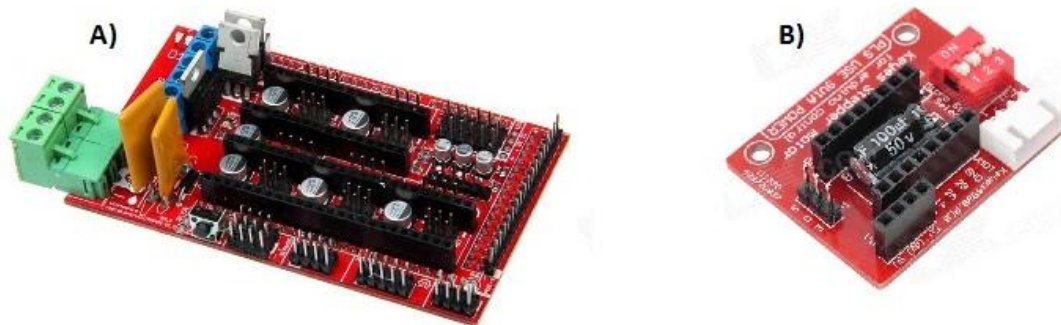


Figura 36 - a) Placa RAMPS 1.4; b) Placa de extensão para um controlador.

### 3.3.2 Marlin firmware

O *firmware* refere-se ao programa instalado no microcontrolador que permite, para além de interpretar as instruções em código g, gerir e controlar todos os componentes periféricos tais como os motores de passo, sensores de temperatura, ventoinhas de arrefecimento, entre outros.

Utilizou-se o *firmware* Marlin, versão 1.1.0-RC7, devido à compatibilidade com as configurações de uma impressora delta e pela facilidade na adaptação dos códigos fornecidos para uma configuração delta de uma impressora 3D, tais como volume de impressão, comprimento dos braços e área de impressão. Ou seja, é possível a edição de parâmetros de movimentação e impressão. O *firmware* pode ser atualizado a qualquer momento, sendo necessária uma interface USB entre o Arduino e o *Marlin Firmware* para que se possa descarregar a atualização. Esta mesma gravação é feita diretamente através do IDE do Arduino. Foram usados os diversos exemplos para impressoras 3D do tipo delta, o que facilitou a adaptação do *firmware* para a impressora a ser desenvolvida. Foram seguidos os passos de configuração disponibilizados diretamente pelo *Marlin Firmware* [36].

Para aproveitamento das funcionalidades do *Diamond extruder*, e consequente impressão a três cores, foi necessária a ativação do 2º e 3º alimentador. O 2º alimentador foi ligado ao microcontrolador disponível na *RAMPS 1.4*, enquanto o 3º alimentador teve que ser ligado à placa de extensão. Estas ligações dos alimentadores referem-se aos motores de passo associados. É possível a observação esquemática na Figura 37 das ligações efetuadas.



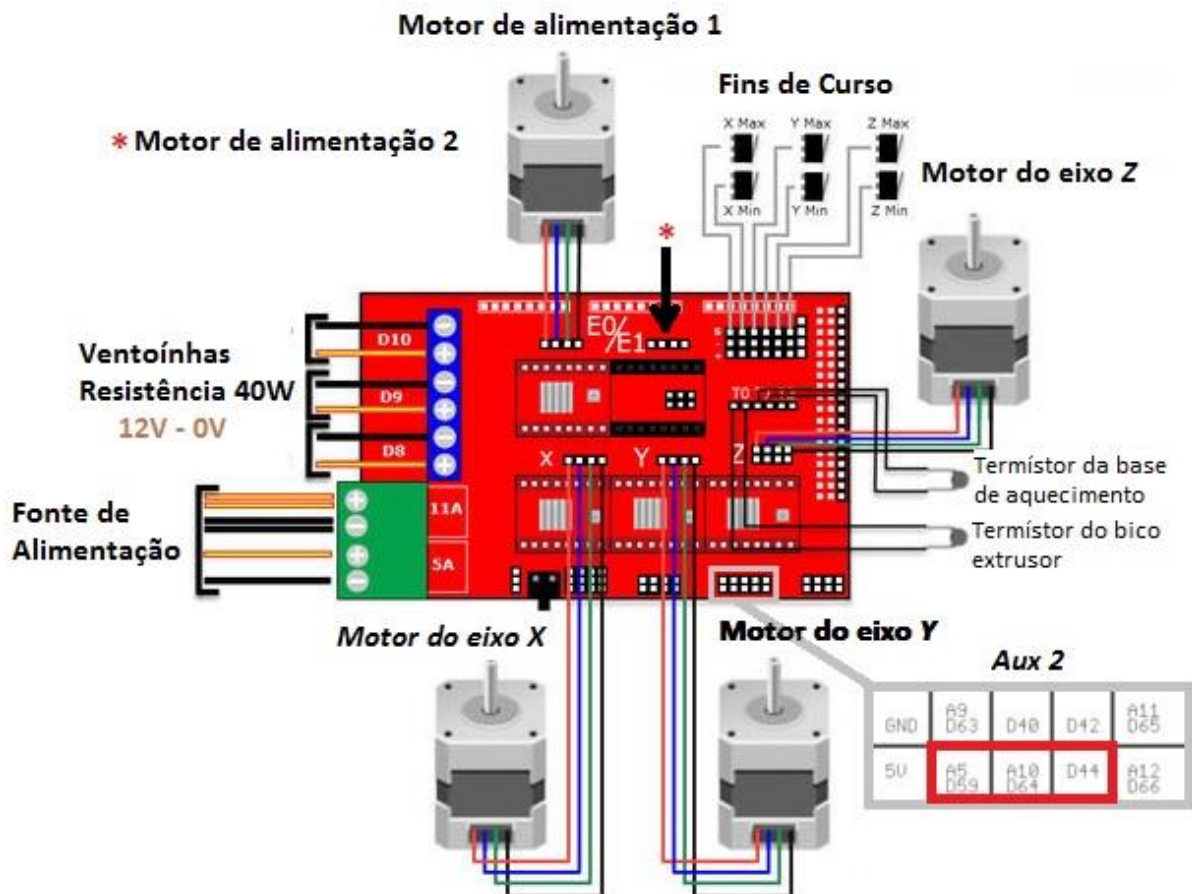


Figura 37 - Esquematização das ligações eletrônicas e identificação dos pinos auxiliares para o 3º alimentador.

No anexo B, encontram-se detalhadamente todas as ligações da Figura 37, efetuadas na placa RAMPS 1.4, inclusive os pinos de ligação para a placa de extensão como já demonstrado na figura anterior. De referir que as ligações D8, D9 e D10 são conhecidas como *EFB* (Extruder, Fan, Base), ou seja são responsáveis pelo controlo das resistências responsáveis pelo aquecimento do extrusor e da cama de impressão e pelo controlo da potência da ventoinha que se pode instalar para arrefecimento do material que acaba de ser extrudido, ou seja, apontada em direção ao bico do extrusor.

A placa tem ligações que permitem aos mais variados componentes serem ativados sempre que se liga a fonte de alimentação. Como exemplo destes mesmos componentes, pode ser referido as ventoinhas responsáveis pelo arrefecimento dos dissipadores de calor e dos componentes elétricos que se encontram na parte inferior da impressora.

Definiu-se o número de extrusores para três, denominando-se o tipo de extrusor como *single nozzle* ou *mixing extruder*. Estas duas variantes apresentam diferenças aquando da impressão com três filamentos em simultâneo ou alternadamente. A programação do *firmware* influi no que será possível realizar ao nível de mistura ou alternância de cores durante a impressão e na possibilidade de realizar gradientes na transição entre cores. O código desta mesma programação realizado no *Arduino* é visível na Figura 38.

```

// This defines the number of extruders
// :[1,2,3,4]
#define EXTRUDERS 3

// For Cyclops or any "multi-extruder" that shares a single nozzle.
#define SINGLENOZZLE

// A dual extruder that uses a single stepper motor
// Don't forget to set SSDE_SERVO_ANGLES and HOTEND_OFFSET_X/Y/Z
// #define SWITCHING_EXTRUDER
#if ENABLED(SWITCHING_EXTRUDER)
  #define SWITCHING_EXTRUDER_SERVO_NR 0
  #define SWITCHING_EXTRUDER_SERVO_ANGLES { 0, 90 } // Angles for E0, E1
  // #define HOTEND_OFFSET_Z {0.0, 0.0}
#endif

*/
// #define MIXING_EXTRUDER
#if ENABLED(MIXING_EXTRUDER)
  #define MIXING_STEPPERS 3 // Number of steppers in your mixing extruder
  #define MIXING_VIRTUAL_TOOLS 16 // Use the Virtual Tool method with M163 and M164
  // #define DIRECT_MIXING_IN_G1 // Allow ABCDHI mix factors in G1 movement commands
#endif

```

Figura 38 - Definição do tipo de extrusor: *Single Nozzle* activo, *Mixing extruder* desactivo.

A ligação da placa de extensão ao microcontrolador foi realizada através das funções dos pinos ENABLE, STEP, DIRECTION para os pinos 64, 44 e 59 como é possível observar na Figura 39. A definição desta mesma extensão teve que ser realizada no subficheiro *PINS\_RAMPS.h* do firmware Marlin.

```

#define E2_STEP_PIN      64
#define E2_DIR_PIN       59
#define E2_ENABLE_PIN    44

```

Figura 39 - Ligação dos pinos da placa de extensão à RAMPS 1.4.

As principais alterações definidas nos subficheiros *configuration.h* e *pins\_ramps.h* estão referidas no anexo B.

Em suma, este módulo é responsável pelo controlo do movimento dos seis motores de passos, três relativos à transmissão de movimentos dos carris e os três restantes pela alimentação do filamento. É também responsável pelo aquecimento e consequente regulação da temperatura do bico extrusor e da cama de impressão. Pode-se ainda referir a importância relativa à deteção dos fins-de-curso, dado que a partir desta mesma ativação, é possível detetar a posição correta do extrusor durante qualquer momento da impressão. Por último, controla-se as ventoinhas de arrefecimento e é possível uma paragem de emergência a qualquer momento da utilização da impressora através do botão *reset* acoplado ao suporte do painel da impressora.

Para o utilizador controlar todos estes parâmetros, monitoriza-los e editá-los pode ser realizada a conexão a um computador para posterior utilização de softwares CAM e de controlo de impressão já referidos. Este mesmo controlo também pode ser realizado diretamente a partir do painel de controlo, através de um LCD associado à placa RAMPS 1.4.

### 3.3.3 Microcontroladores para controlo dos motores de passo

Procedeu-se à substituição das *drives* A4988 pelo modelo DVR885 para o controlo dos motores de passo dos eixos X, Y, Z. Esta alteração permite o aumento na resolução dos números de passos por milímetros para o dobro do que estava definido anteriormente através das *drives* A4988. Estes microcontroladores, encontram-se representados na Figura 40.

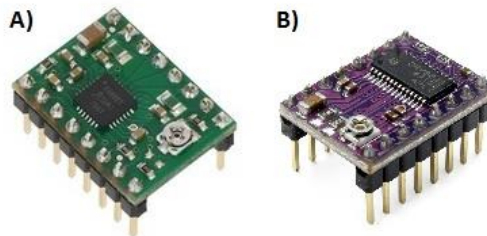


Figura 40 - Microcontroladores: A) A4988; B) DVR885.

Foi possível um aumento do número de passos por milímetro de 80 passos/mm para 160 passos/mm devido à disponibilidade do modelo DVR885 para ser programado em 32 *bits*, ao contrário do máximo de 16 *bits* que seria possível definir através das *drives* A4988. Em suma, esta alteração permite o melhoramento da precisão do posicionamento do extrusor ao longo da impressão. A necessidade de um aumento dos números de passos para os motores de passos dos alimentadores não seria tão notória devido à menor velocidade com que esta alimentação é feita comparativamente aos mesmos valores de velocidade nas movimentações do extrusor.

Com isto, foram efetuadas as seguintes alterações no *firmware*:

```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {160, 160, 160, 48.35}
#define MICROSTEP_MODES {32,32,32,16,16,16}
```

Figura 41 - Definição no *firmware* do número de passos/mm e *bits* de cada motor de passo.

### 3.3.4 Suporte do Arduino, da placa RAMPS 1.4 e da placa de extensão

Com o objetivo de promover uma reorganização da componente eletrónica da impressora, que se localiza no interior da base inferior foram efetuadas inúmeras alterações. Sendo assim, foi desenhada uma estrutura de suporte em *SolidWorks* com o intuito de formar uma unidade singular da parte das placas mencionadas e de uma ventoinha como método de arrefecimento das mesmas. Os motivos para a reorganização das ligações eletrónicas são observáveis na Figura 42.

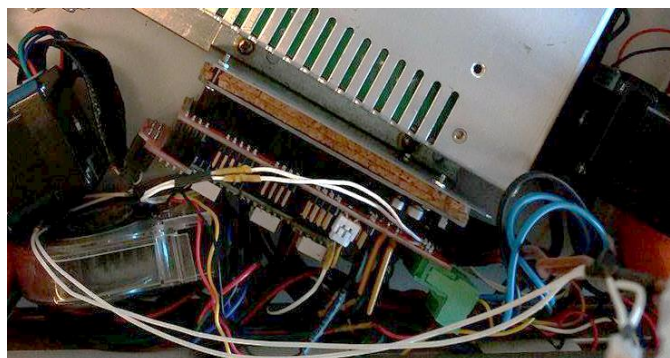


Figura 42 - Organização prévia da parte eletrónica na base inferior da impressora.

Para resolução dos problemas de acessibilidade às ligações elétricas das placas, o suporte desenvolvido serviu para que todos os componentes ficassem dispostos horizontalmente, o que permite um melhor manuseamento caso seja necessária substituição ou correção de alguma ligação efetuada previamente. Este desenho CAD foi posteriormente impresso na *CubePro Duo* do LDPS com o material ABS como filamento. O suporte possui ainda três furos que irão permitir a sua fixação ao perfil extrudido da base inferior da impressora. O conjunto final das placas é visível na Figura 43.

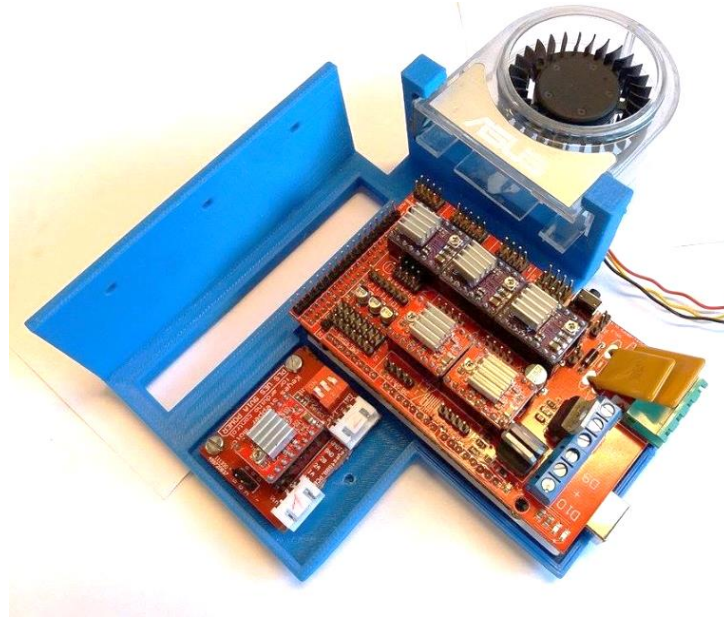


Figura 43 - Suporte desenvolvido para as placas do Arduino, da RAMPS 1.4 e de extensão.

### 3.3.5 Organização da base inferior da impressora

Para que fosse possível a colocação do suporte das placas mencionado, optou-se pelo aumento da base inferior da impressora, onde se encontravam todas as ligações eletrônicas referidas previamente, os motores de passo dos carris de cada eixo e a fonte de alimentação.

Esse aumento foi conseguido através da adição do perfil extrudido que se encontrava na base superior da estrutura da impressora. Como será explicado adiante, esta mesma base superior será substituída por uma outra estrutura. O aumento da altura da base inferior da impressora e o modo de fixação dos perfis extrudidos são visíveis na Figura 44.



Figura 44 – A) Modo de fixação entre os perfis extrudidos; B) Aumento da base inferior da impressora.



Como é possível observar na Figura 45, a acessibilidade ao Arduino, à placa RAMPS 1.4 e à placa de extensão tornou-se mais facilitada. Esta mesma imagem pode ser comparada à Figura 42 para que se observem as melhorias implementadas.

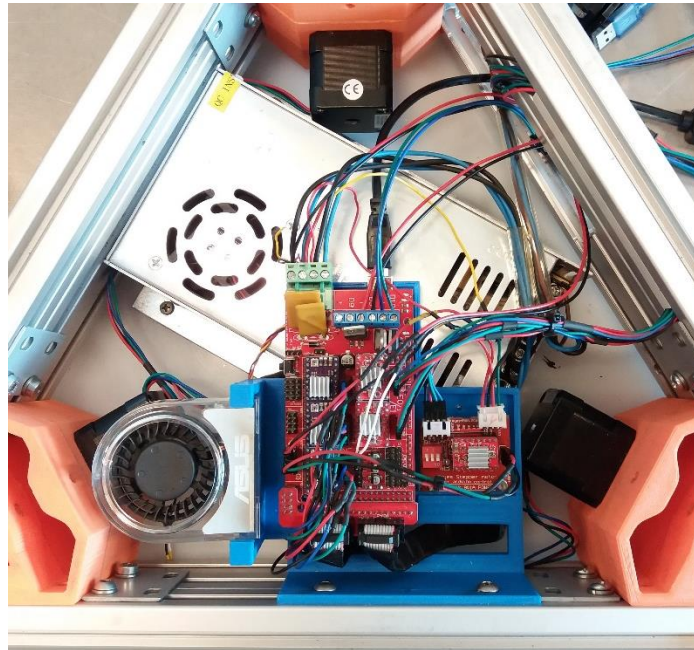


Figura 45 - Organização dos componentes eletrônicos.

Devido à reorganização da unidade de alimentação de filamento e dos fios elétricos necessários para a ligar diretamente ao extrusor, foi substituída a placa de ligações que existia. Isto foi possível devido à utilização dos engates de quatro fios, que são identificáveis na Figura 46.

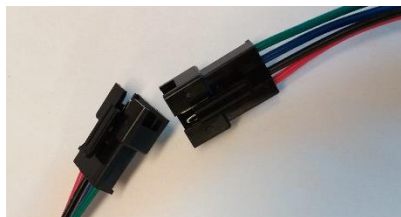


Figura 46 - Engate de 4 fios elétricos (22 AWG).

Esta mesma placa de ligações servia para a ligação à fonte de alimentação e ligação USB, como se constata na Figura 47. Encontrava-se situada lateralmente na base inferior da impressora.



Figura 47 - Placa de ligações original.

A nova placa foi desenhada em *SolidWorks* para posterior funcionamento em chapa de aço galvanizado com espessura de 1 mm. O desenho em *SolidWorks* e a peça final podem ser visualizados na Figura 48. Os componentes originais foram mantidos, sendo que foram adicionadas entradas para ligação dos engates eletrónicos referidos anteriormente.

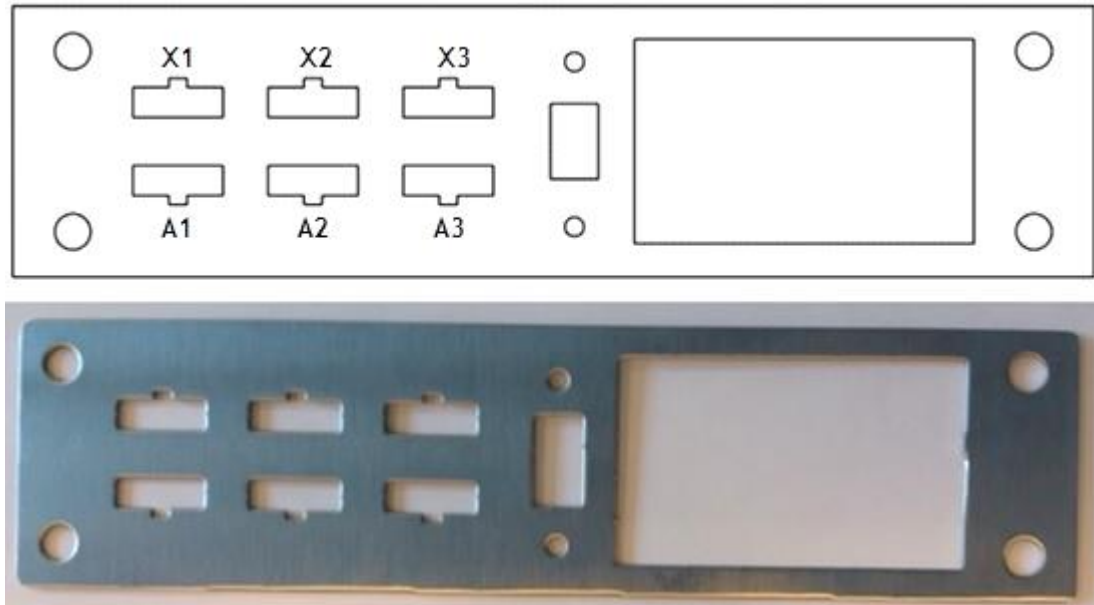


Figura 48 - Conceção da nova placa com as ligações elétricas de controlo.

Depois de realizadas todas as ligações eletrónicas, foi possível a fixação da placa na base inferior da impressora. O significado da numeração de cada furo representa a seguinte ligação eletrónica:

- X1 – Ventoinha de arrefecimento acoplada aos dissipadores de calor do *diamond extruder* e resistência (40W) de aquecimento do bico extrusor.
- X2 – Termístor do bico extrusor.
- X3 – Ventoinha de arrefecimento auxiliar para arrefecimento da peça durante a sua impressão.
- A1 – Alimentador nº 1; A2 – Alimentador nº 2; A3 – Alimentador nº 3.

O resultado final pode ser observado na Figura 49. Com isto tornou-se o módulo de controlo e comunicação da impressora mais acessível, não sendo necessário proceder a alterações no interior da impressora caso se pretenda alterar algum alimentador ou componente acoplado ao *diamond extruder*.



Figura 49 - Placa de controlo da base inferior da impressora modificada.

O desenho técnico desta placa é observável no Anexo C.

### 3.4 Módulo estrutural e de movimentação

Este módulo é constituído por um sistema de movimentação delta linear através do efetor, dos braços e dos carris. A transmissão de movimentos entre os componentes referidos é suportada através de rótulas magnéticas. O deslizamento dos carris, ao longo das torres do chassis, através de rolamentos lineares assume extrema importância por ser responsável pela precisão de todas as impressões efetuadas. Por este mesmo fator, torna-se imperativo que esta estrutura seja o mais estável e firme possível para que a partir de uma correta calibração do sistema de movimentação se consiga obter precisões ótimas para a realização das impressões.

#### 3.4.1 Estrutura da impressora

Foi desenvolvida uma estrutura em alumínio, que consiste no facto dos três carris serem fixados por uma base inferior e superior, que faz também de suporte à base de impressão. Esta mesma base inferior em alumínio permite uma maior precisão e calibração da base de impressão. Anteriormente, a base de impressão era suportada apenas por um painel em Polipropileno (PP) (parte observável na Figura 52), material que sofria flexão devido ao peso exercido pela base de impressão. Devido à geometria da base inferior maquinada, esta mesma flexão acaba por ser anulada devido à introdução de uma parte auxiliar no interior da base inferior.

Estas peças em liga de alumínio foram maquinadas numa máquina *DMG*, através do *software MasterCam*, como é possível observar na Figura 50.

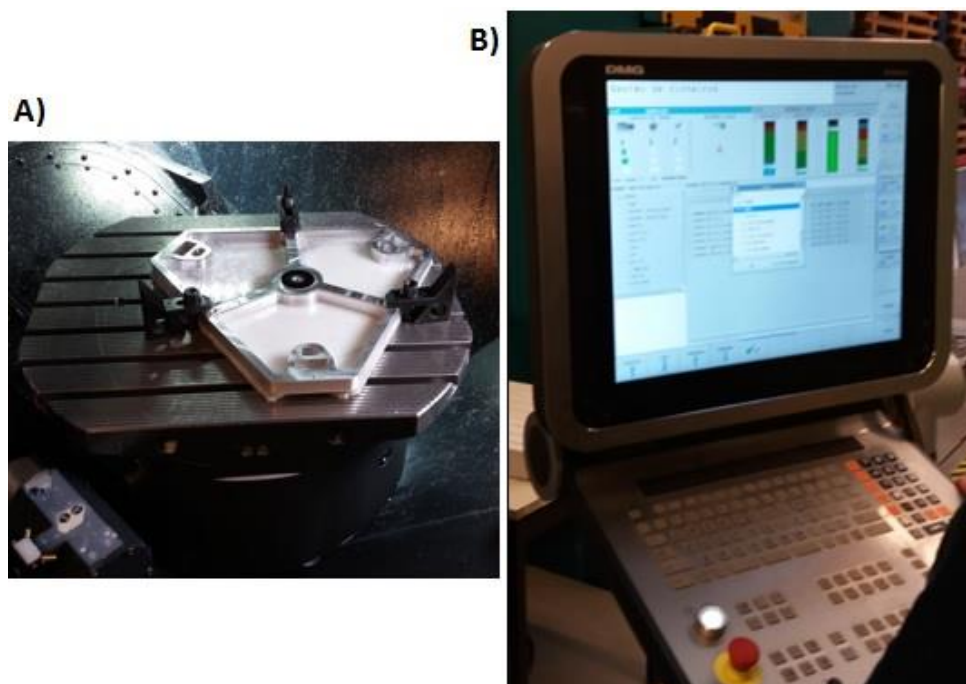


Figura 50 - A) Parte inferior a ser maquinada. B) Controlo da máquina através do *software MasterCam*.

A parte superior da estrutura em alumínio permitiu uma redução da espessura desta parte da impressora, sendo que apenas foram necessários na parte superior da estrutura os fios elétricos de fim de curso em cada eixo e um fio elétrico para se fazer a ligação de um LED que permita iluminar todo o volume de impressão. De referir que as ligações eletrónicas dos motores de passo dos alimentadores e as ligações eletrónicas à unidade do extrusor encontravam-se na

base superior da impressora, sendo que agora se encontram organizadas na base inferior como já foi mencionado, devido ao desenvolvimento da nova unidade de alimentação e da guia que permitirá a ligação direta ao extrusor a partir da base inferior da impressora. Tanto a unidade de alimentação de filamento, como a guia das ligações diretas ao extrusor serão abordadas de seguida. No anexo D e E, é possível verificar o desenho técnico da base inferior e superior respetivamente.

O facto da rigidez do conjunto ser melhorada, o que leva a uma melhor precisão do sistema de movimentação da impressora, prende-se com a fixação dos perfis das torres. Previamente encontravam-se fixados nos cantos impressos em PLA, o que pode levar a que os esforços realizados comesçassem a criar pequenas fraturas nestes mesmos cantos. Este mesmo problema não ocorre com a fixação na estrutura de alumínio que foi maquinada. Esta alteração pode ser constatada na Figura 51.

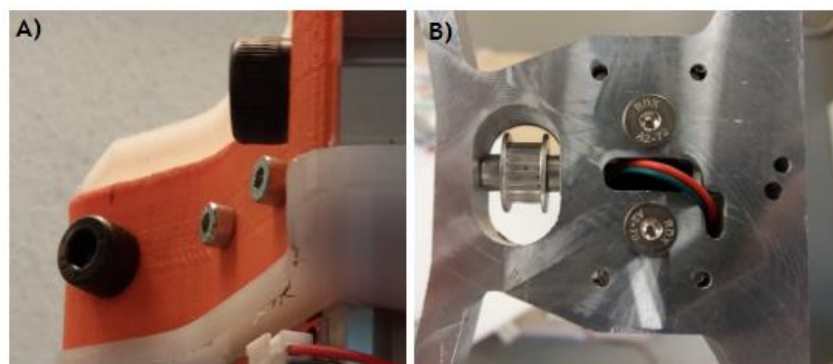


Figura 51 - Alteração da fixação das torres dos eixos; A) PLA; B) Alumínio.

Estes perfis são também responsáveis pela passagem no seu interior dos fios elétricos da base para o topo. A respetiva fixação nas estruturas maquinadas da base inferior e superior da impressora pode ser observada na Figura 52.

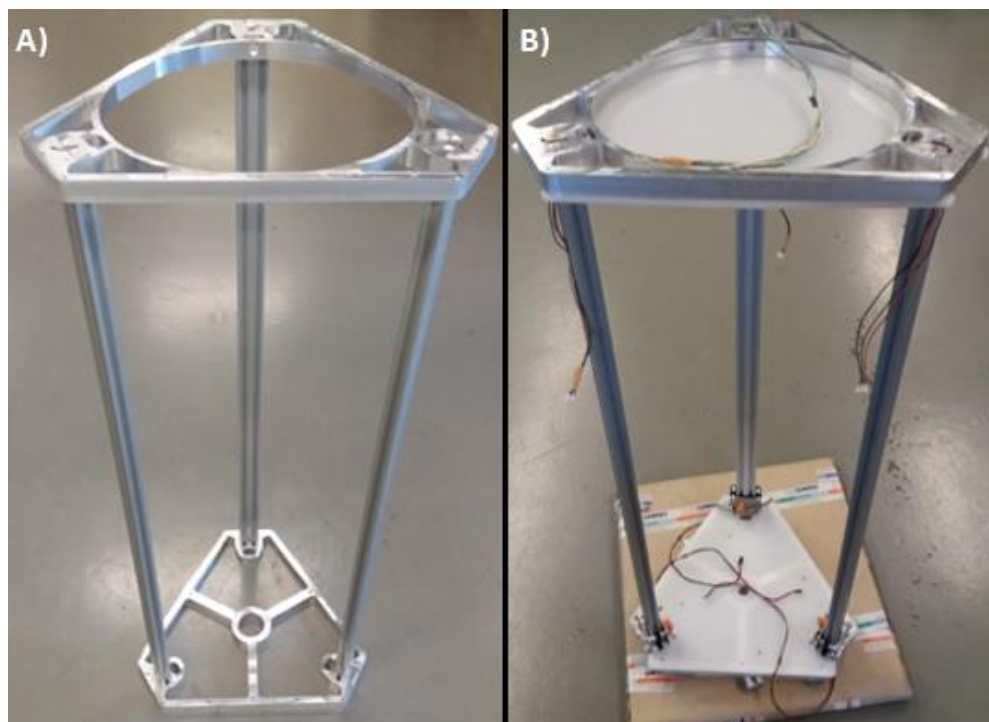


Figura 52 - A) Estrutura metálica em alumínio. B) Ligações efetuadas até ao topo da estrutura.



Uma outra vantagem passa pelo aumento da possível altura de impressão em 50 mm pelo facto de a estrutura em alumínio pousar sobre a parte inferior da impressora, fazendo com que as torres não sejam introduzidas pelas ranhuras dos cantos em PLA, visíveis na Figura 53, onde é possível observar a estrutura metálica fixa sobre os perfis da base inferior.

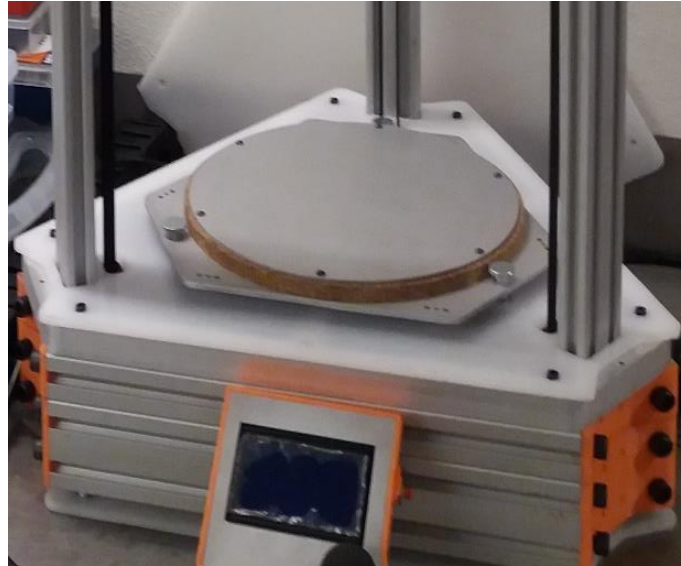


Figura 53 – Fixação da estrutura em alumínio à base inferior da impressora.

Quanto à base superior da impressora é possível comparar a diferença obtida com as modificações, de realçar ainda que foi inserido um LED de forma a iluminar a impressora aquando as impressões estejam a decorrer para melhor observação dos pormenores da peça. Como referido anteriormente, estes mesmos perfis extrudidos que estavam a ser utilizados na parte superior foram utilizados no aumento da base inferior da impressora, o que permite a reorganização dos componentes eletrónicos que aí se encontravam. As diferenças são observáveis na Figura 54.

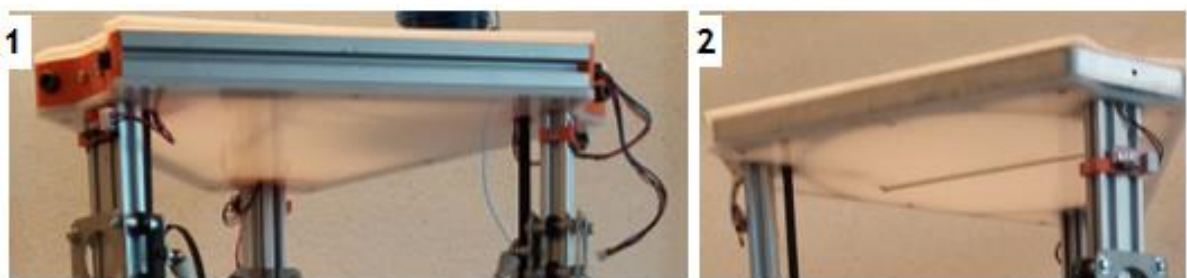


Figura 54 – 1) Base superior da impressora original; 2) Base superior após modificações.

### 3.3.2 Ligação direta ao extrusor

O tubo de bowden associado ao alimentador e as ligações eletrónicas da resistência, do termístor e das ventoinhas associadas ao extrusor encontravam-se na base superior da impressora, fazendo com que os fios elétricos e o tubo de *bowden* do único alimentador fossem conectados ao extrusor, como se pode observar na Figura 55.

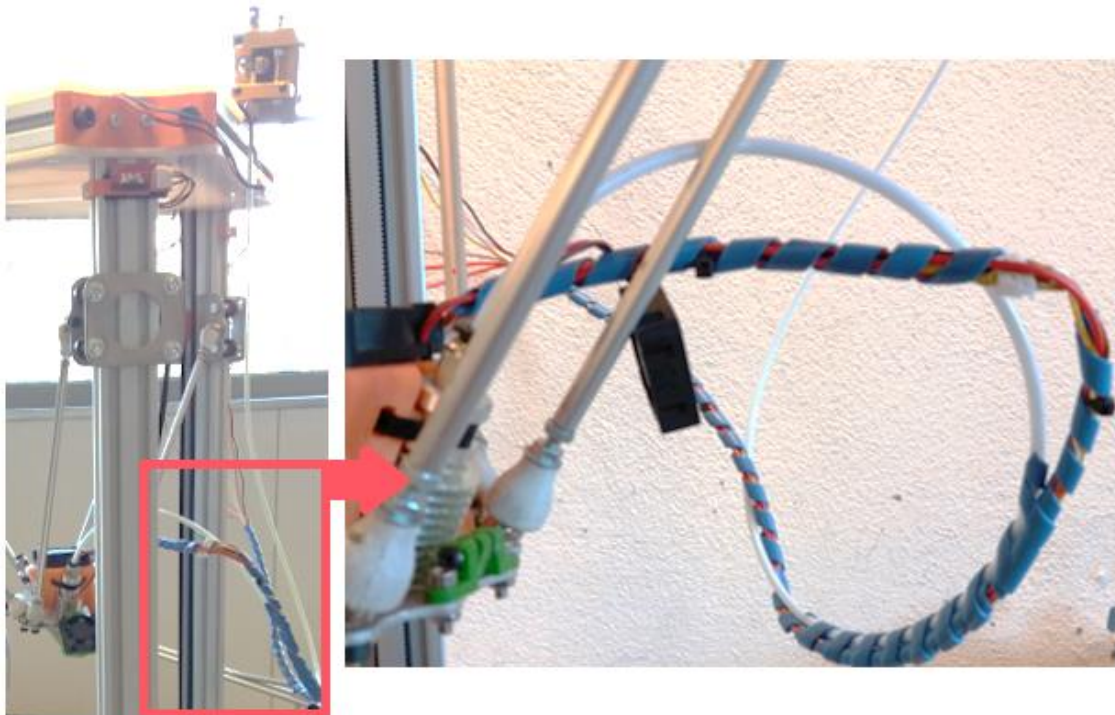


Figura 55 – Anteriores ligações elétricas e do tubo de *bowden* ao extrusor.

Como o objetivo passa pela impressão simultânea a 3 cores, foi necessário adicionar a estas mesmas ligações mais dois tubos de *bowden*, um para cada novo alimentador. Como forma de reorganização destas mesmas ligações procedeu-se à ligação direta ao extrusor destes componentes a partir da nova placa de ligações com o auxílio de uma guia, que pode ser visualizada na Figura 56, que permite o encurvamento necessário durante todos os movimentos do bico extrusor pela área de impressão.

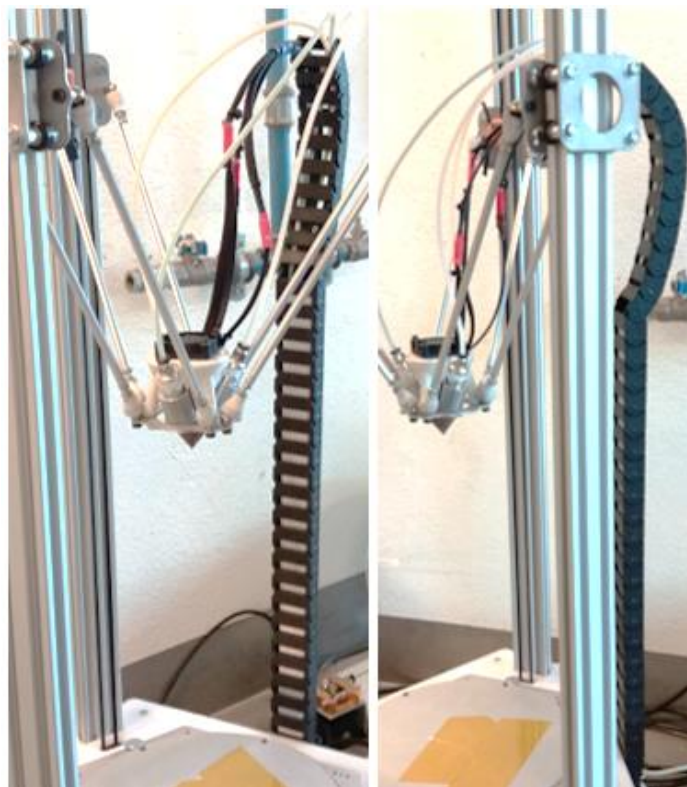


Figura 56 - Guia das ligações diretas ao *diamond extruder*.

Como é possível constatar, através da guia, além da organização que é possível obter com os fios e tubos, faz com que os tubos de *bowden* se encontrem numa posição o mais fixa possível durante a impressão, o que impossibilita que os mesmos se dobrem em demasia durante os movimentos do extrusor, fazendo com que o atrito registado entre o filamento e o tubo de *bowden* nunca seja demasiado elevado impossibilitando a alimentação do mesmo filamento a qualquer momento da impressão.

De referir que como método de fixação da guia, foi utilizada uma chapa de alumínio com uma altura de 500 mm e espessura de 1 mm. Esta mesma chapa foi quinada com as dimensões interiores da guia, como se pode observar na Figura 57, assim como o seu modo de fixação.

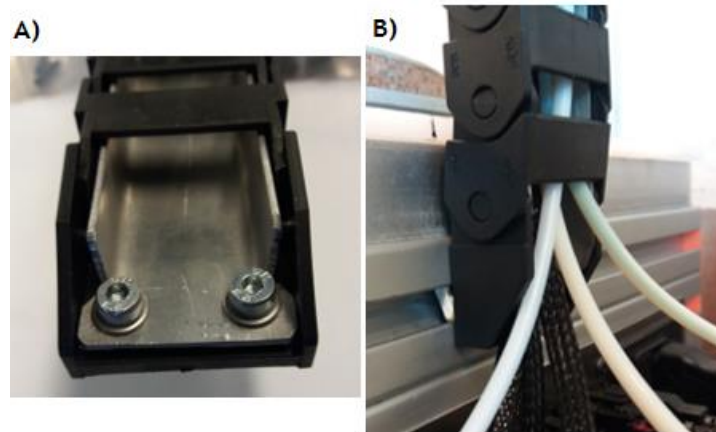


Figura 57 - Modo de fixação através da chapa quinada de alumínio. A) vista frontal; B) vista lateral da fixação da guia ao perfil extrudido da base inferior da impressora.

A chapa quinada, além de permitir a fixação da guia à parte lateral base da impressora, permite o encurvamento, a partir de uma altura de 500 mm, de modo a acompanhar o movimento do extrusor até um ponto mais próximo da base de impressão como é visível na Figura 58.



Figura 58 - Encurvamento da guia das ligações ao extrusor.

Visto que o extrusor se apresenta como o componente mais sensível a danificações ao longo das impressões, quer ao nível do aquecimento, entupimento de filamento ou até mesmo avaria nas ligações elétricas devido ao aquecimento elevado, optou-se pela implementação de engates eletrónicos para que seja possível remover o *diamond extruder* da impressora e se possa proceder ao seu manuseamento/manutenção. Estes mesmos engates encontram-se visíveis na Figura 59, sendo o componente vermelho o que separa os fios elétricos, cobertos pelas mangas pretas que protegem os fios elétricos que se apresentam no exterior da impressora.



Figura 59 - Pormenor dos engates elétricos em todas as ligações ao extrusor.

### 3.5 Módulo da base de impressão

A base de impressão assume especial importância devido à calibração que é necessário realizar para que a mesma se encontre nivelada em todos os seus pontos à mesma distância do bico extrusor. Uma boa calibração da base de impressão faz com que a primeira camada de impressão adira perfeitamente, possibilitando um bom acabamento superficial da base da peça depois de retirada. Esta mesma fixação da primeira camada impossibilita os empenos na peça.

A nivelção é realizada manualmente através de parafusos de ajuste com o auxílio de uma mola na parte inferior do suporte, como é observável na Figura 60.

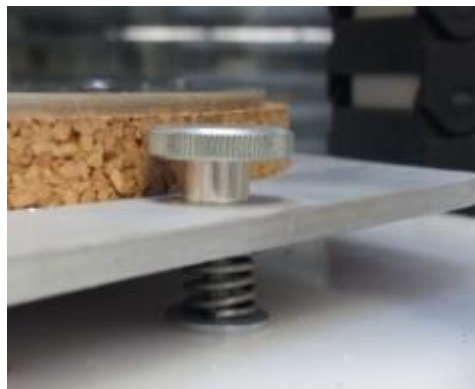


Figura 60 - Parafusos de ajuste da base de impressão.



Optou-se pela alteração do suporte da base de aquecimento por dois motivos. O primeiro dos quais é a maior facilidade de nivelção desta mesma base caso seja composta apenas por três apoios. Isto faz com que a regulação de um dos apoios não influencie nenhum dos outros, visto que três pontos é o mínimo que se precisa para formar um plano. Ao nivelar um deles, os outros dois continuam à mesma altura. No caso dos quatro apoios, como se pode ver na Figura 61, a nivelção de um dos apoios forçaria as molas dos outros três apoios para que se pudesse obter um equilíbrio no plano de impressão. Logo a modificação teria que ser iterativa.

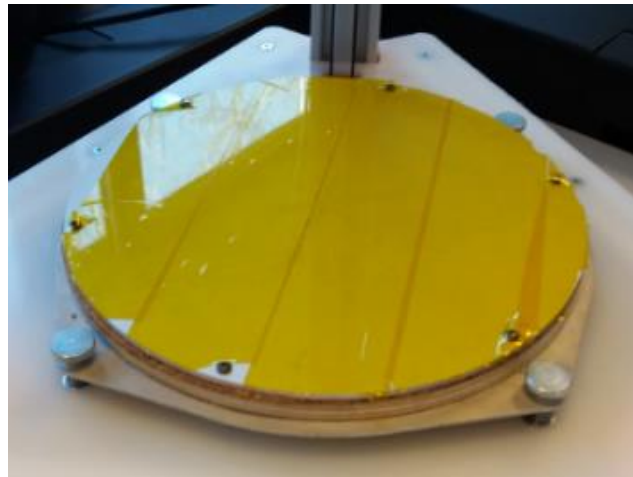


Figura 61 - Estrutura em 4 apoios da base de impressão.

O segundo motivo prende-se com o isolamento entre a base aquecida e o suporte metálico. Anteriormente, este isolamento era composto por um disco de cortiça com espessura de 2 mm (1) e um disco de madeira de 5 mm (3), como é possível observar Figura 62.

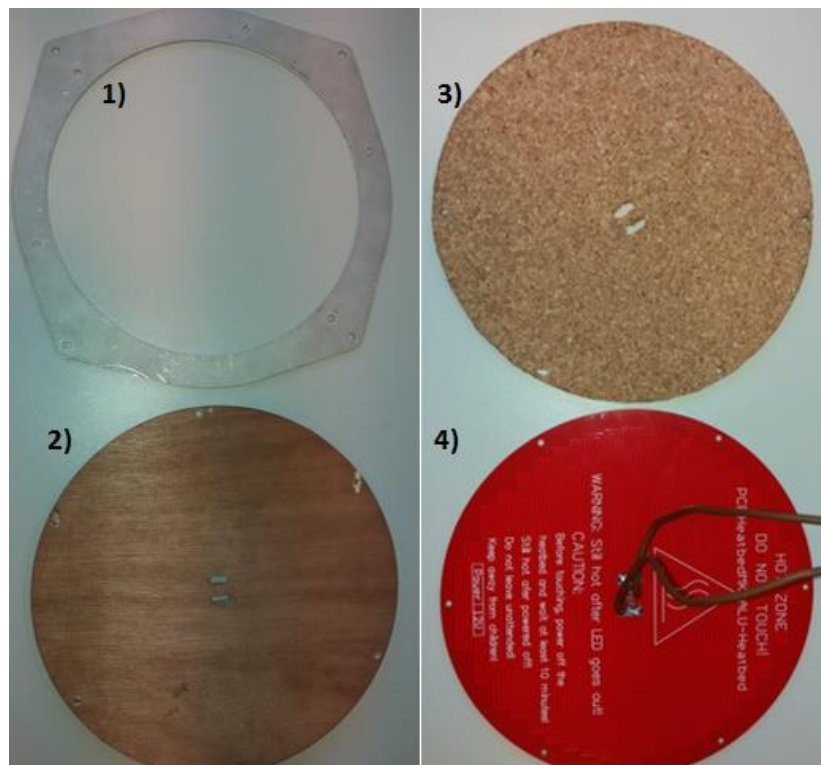


Figura 62 – Elementos da estrutura antiga do suporte da base de impressão.

A montagem dos componentes referidos na Figura 62, esta ordenada da seguinte forma 1-2-3-4, devido ao menor coeficiente de expansão térmica da cortiça em comparação com a madeira utilizada.

Foi constatado que a madeira fraturou devido às forças de aperto aquando da ligação entre os componentes referidos. Posto isto, foram efetuados os seguintes cálculos ao nível da transferência de calor para que um disco de cortiça fosse suficiente como isolamento.

A placa da base de impressão é uma *PCB HeatBed MK3ALU*, com uma área de  $0,038 \text{ m}^2$ . Com a base aquecida, alimentada a 12 V, apresenta valores de potência calorífica a rondar os 96 W. O valor da condutividade térmica da cortiça utilizada ronda os  $0,04 \text{ W/m K}$ . Utilizando uma temperatura da base de impressão de cerca de  $70^\circ\text{C}$ , tendo em conta que o suporte desta mesma base rondará os  $20^\circ\text{C}$ , foi possível efetuar o seguinte cálculo para obtenção da espessura necessária:

$$q = \frac{t1 - t2}{\frac{e}{k * A}} \quad (1)$$

$$96 = \frac{70 - 20}{\frac{e}{0,04 * 0,038}} \quad (2)$$

$$e = 0,0008 \text{ m} = 0,8 \text{ mm} \quad (3)$$

Chegou-se à conclusão de que uma espessura de 10 mm seria suficiente para que se dissipasse todo o calor nessa direção. Este disco de cortiça foi maquinado numa *CNC OUPLAN*. A fratura da madeira e consequente produção do disco de cortiça encontra-se representada na Figura 63.

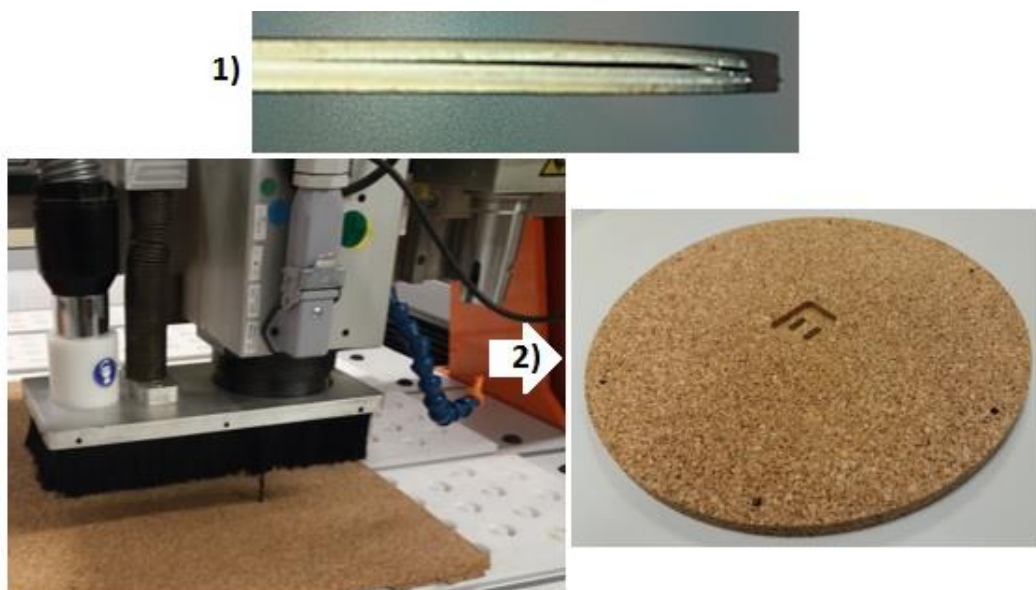


Figura 63 - 1) Fratura no disco de madeira. 2) Produção de um disco de cortiça.

O suporte foi puncionado, tendo sido utilizado alumínio com espessura de 3 mm. Na Figura 64 é possível constatar o aspeto do suporte após puncionamento (A) e depois de ter sido alvo de granalhagem para acabamento superficial (B).

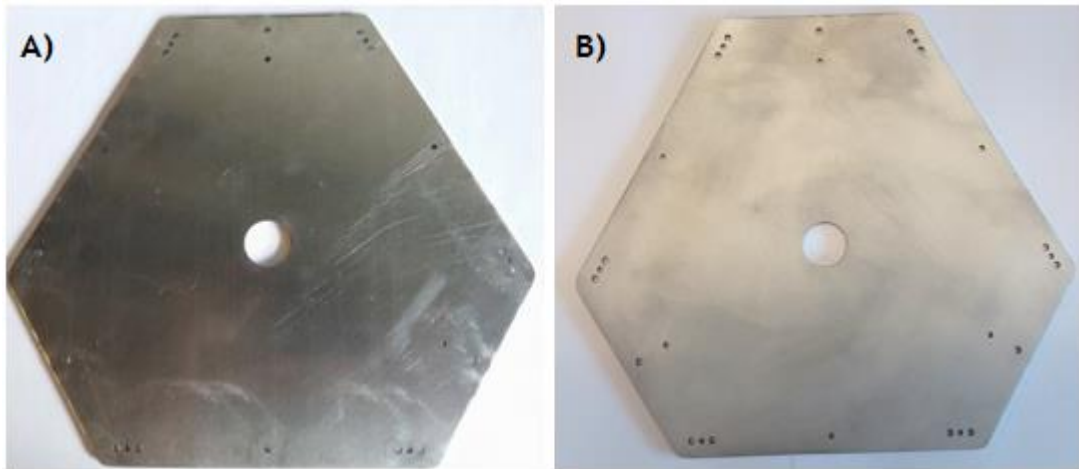


Figura 64 - Suporte da base de impressão com 3 apoios.

O desenho técnico do suporte da base de impressão, referido previamente, encontra-se no anexo F.

Deste modo, foi possível a fixação da base de aquecimento, do isolamento em cortiça e do suporte à estrutura da impressora, como é possível observar na Figura 65.



Figura 65 - Módulo da base de impressão.

### 3.6 Módulo de extrusão

O módulo de extrusão encontra-se associado à alimentação do filamento, condução do mesmo filamento até à entrada do extrusor e à garantia de que o filamento se encontra arrefecido até entrar no extrusor para posterior extrusão a quente. A montagem do extrusor ao efetor, como referido previamente, também é intrínseca a este mesmo módulo.

Como o objetivo final passa pela impressão simultânea a três cores, o que se pretende realizar é uma unidade de alimentação do filamento e posterior condução até ao extrusor para que a impressão seja realizada sem qualquer intervenção do utilizador, aspeto importante aquando das possíveis mudanças de cor do filamento a ser extrudido.



### 3.6.1 Unidade de alimentação de filamento

A unidade de alimentação de filamento é constituída por um conjunto de alimentadores, compostos pelos motores de passo *NEMA 17 STEPPER MOTOR*, engrenagens condutoras de filamento, rolamento de condução do filamento e tubos de *bowden* em PTFE. Os três alimentadores encontram-se visíveis na Figura 66.

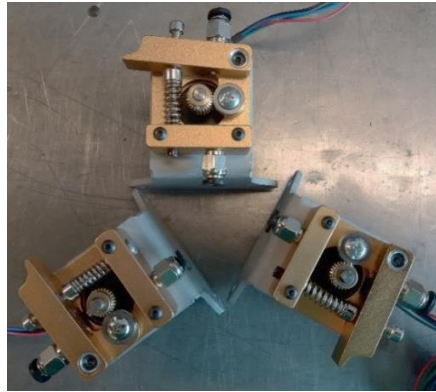


Figura 66 - Alimentadores de filamento necessários à impressão.

Além dos alimentadores é necessário ter em conta as três bobines de filamento. Esta mesma unidade alimentação foi colocada ao lado da impressora de modo a facilitar a substituição de bobines de filamento ou até mesmo a resolução de algum problema com o filamento. Se estivesse colocada na base superior da impressora, ocuparia menos espaço, mas estaria a uma altura muito elevada, cerca de 1,15 metros desde a base até ao topo, o que impossibilitaria um fácil acesso.

Foi realizado um esboço em *SolidWorks*, para colocar em prática a ideia da unidade de alimentação do filamento independente da impressora e para verificação de medidas e alterações necessárias. O esboço encontra-se explícito na Figura 67.

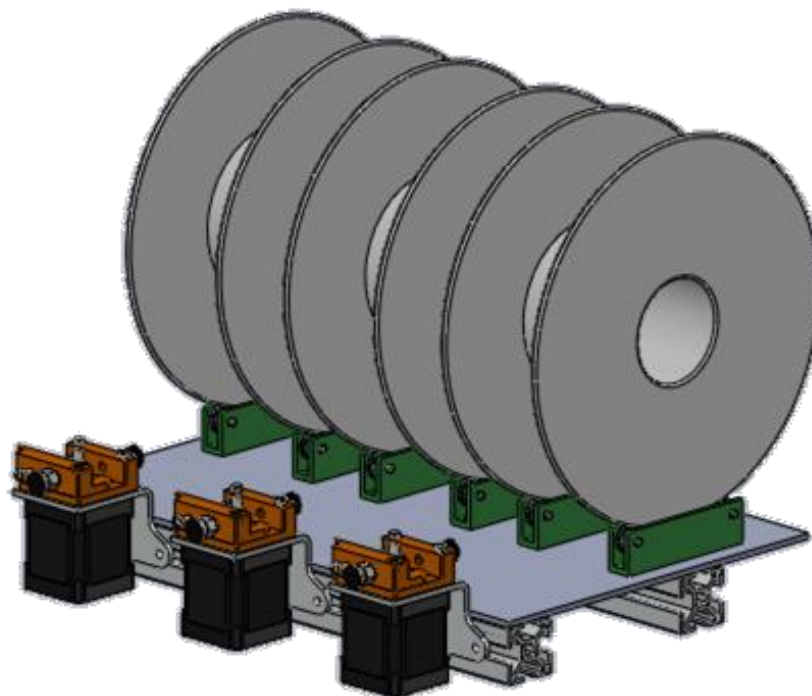


Figura 67 - Esboço da unidade de alimentação de filamento.

Estas mesmas bobines encontram-se em suportes que são guiados através de uma guia de diâmetro 6,5 mm pelo facto de os tamanhos das bobines serem variáveis entre diferentes fornecedores. Estes mesmos suportes foram desenhados e impressos numa impressora *CubePro Duo* do LDPS, em ABS, como é possível observar na Figura 68.

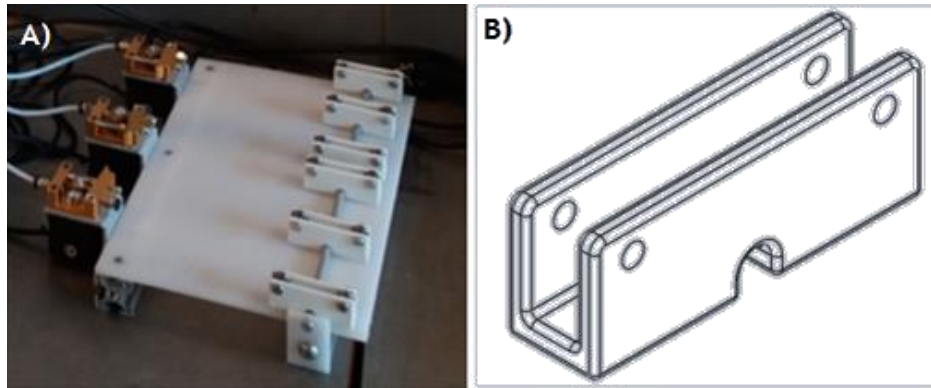


Figura 68 – A) Suportes de bobine de filamento e respetiva guia; B) Esboço do desenho CAD para impressão.

Como modo de fixação dos rolamentos, foram utilizados rolamentos com diâmetro interior de 4 mm, o que levou a que fossem utilizados parafusos roscados M4 para a sua colocação. Para suplementar os 4 mm de espaço livre, foram utilizadas anilhas M4 com espessura de 1 mm para que o rolamento não se movimentasse lateralmente, permitindo assim apenas a sua rotação sobre o parafuso para facilitar o esforço resultante da engrenagem condutora do filamento contida no alimentador. Estes componentes são visíveis na Figura 69.



Figura 69 - Colocação dos rolamentos nos suportes das bobines de filamento.

O resultado final da unidade de alimentação de filamento é observável na Figura 70.

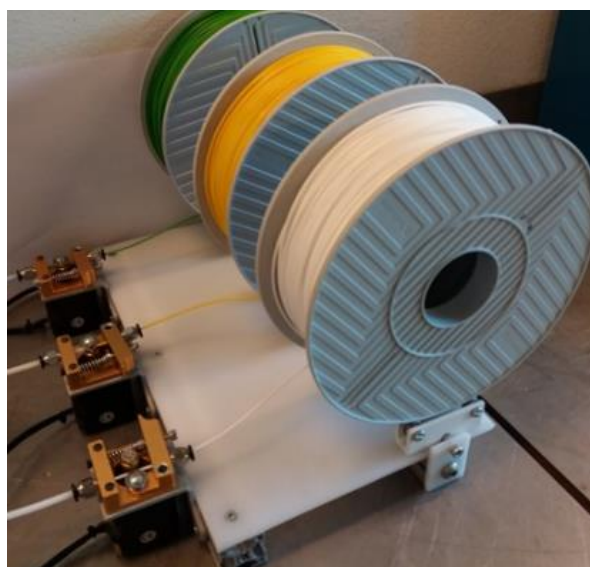


Figura 70 - Unidade de alimentação do filamento concluída.

### 3.7 Calibração

#### 3.7.1 Calibração dos microcontroladores dos motores de passo

Para os controladores dos motores de passo, a corrente que estes fornecem ao motor pode ser afinada através de um potenciômetro. Esta corrente, considerada limite, é proporcional à tensão medida entre o potenciômetro e o pino GND (0V), como se pode observar na Figura 71. Existe uma relação de 2 A/V entre a corrente máxima de funcionamento e a tensão medida. Esta mesma medição tem que ser efetuada sem que os motores de passo estejam ligados e deve ser igual para todos os microcontroladores de modo a permitir a sua calibração conjunta.

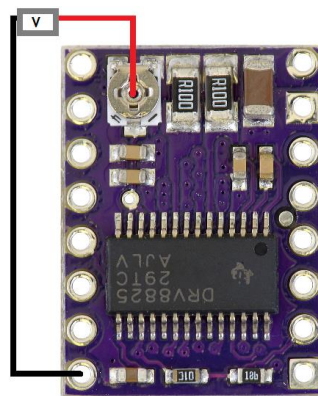


Figura 71 - Medição da tensão num drive *Pololu DVR8825*.

Através de *jumper*s é possível a ativação dos pinos MS1, MS2 e MS3 na placa RAMPS. A combinação entre a ativação destes mesmos pinos define o modo de funcionamento de *microstepping*. Como foram utilizados duas drives distintas foi preciso ter em conta as diferenças que isso englobava. Estas mesmas diferenças podem ser constatadas na Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 – Combinação de ativação de *jumper*s para a drive A4988

MS1	MS2	MS3	<i>microstepping</i>
■✓	■✓	■✗	1/8
■✓	■✓	■✓	1/16

Tabela 7 – Combinação de ativação de *jumper*s para a drive DVR8825

MS1	MS2	MS3	<i>microstepping</i>
■✓	■✗	■✓	1/32
■✗	■✓	■✓	1/32
■✓	■✓	■✓	1/32

Os parâmetros de controlo dos motores de passo, tendo em conta as modificações que foram efetuadas, encontram-se representados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de controlo dos motores de passo

Controladores	Drive utilizada	<i>microstepping</i>	Tensão medida (V)
Alimentadores de filamento	A4988	1/16	0,46
Movimentação X, Y e Z	DVR8825	1/32	0,5

### 3.7.2 Calibração do sistema de movimentação

Depois de efetuada a montagem de toda a estrutura da impressora, foi necessário garantir a correta calibração do sistema de movimentação. Para tal procedeu-se a algumas verificações tais como:

- a nivelção horizontal da base de impressão;
- a verticalidade das torres dos eixos X, Y e Z;
- posicionamento do fim-de-curso em cada uma das torres à mesma altura relativamente à base de suporte para a cama de impressão.

Em cada correia foi implementada uma mola para que fosse possível obter um valor de tensão comum para cada uma das três correias como é possível comprovar na Figura 72.



Figura 72 - Inserção de uma mola na correia.

Como método de calibração da base de impressão utilizaram-se quatro pontos. Foram seleccionados os pontos A (eixo XX), B (eixo YY), C (eixo ZZ) e D que se representam na Figura 73.

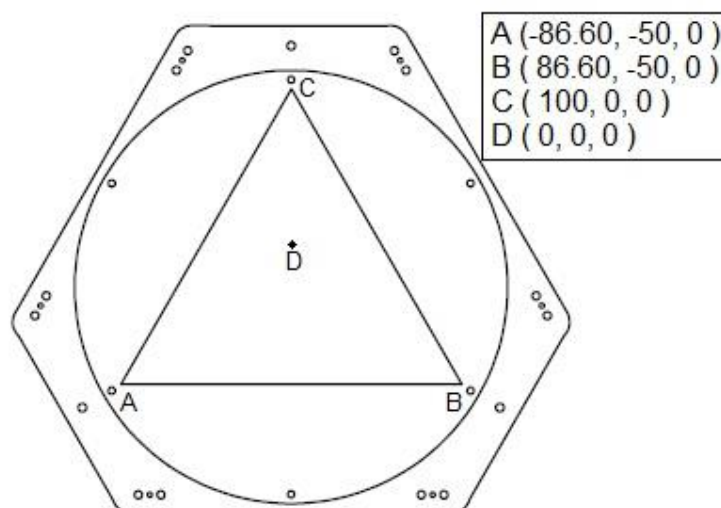


Figura 73 - Pontos da base de impressão utilizados na calibração.

Efetuiu-se uma modificação no *firmware*, para permitir valores de Z negativos, fator essencial para a calibração através da compensação dos fins-de-curso. Esta mesma alteração terá que ser anulada, devido a não ser aconselhável valores de Z negativos aquando da impressão para que o bico extrusor, em nenhuma situação entre em contacto com a base de impressão.

Através do *Pronterface*, foi possível enviar scripts diretamente para o firmware da impressora. Os comandos utilizados foram os seguintes:

- G28 – Movimentação para a posição de origem;
- M666 – Compensação do fim-de-curso;
- M114 – Leitura da posição exata do extrusor;
- M500 – Gravação dos dados no firmware.

Por tratar-se um processo iterativo, é necessária a realização de um ciclo de calibração até que todos os pontos referidos se encontrem calibrados. Começou-se por movimentar o extrusor até ao ponto A (referente ao eixo XX), notando que o extrusor se encontrava acima da base de impressão mais do que o 0.1 mm pretendido. Movimentou-se cuidadosamente o extrusor até que este se encontre a essa mesma distância (medição possível através da utilização de uma folha de papel e verificação da resistência oferecida pelo extrusor durante o seu deslizamento na base de impressão), depois através da aplicação do comando M114 seria dada a informação (-86.60, -50, **z**), este valor de **z** seria compensado através da aplicação do comando M666 X (seguido do valor de **z**). A gravação é realizada sempre após o comando M666. Através do esquema da Figura 74, é possível uma melhor compreensão do método de calibração utilizado. Este mesmo método de calibração para uma impressora do tipo Delta já havia sido utilizado anteriormente e é bastante empregue quando o ajuste da cama de impressão se realiza manualmente [12].

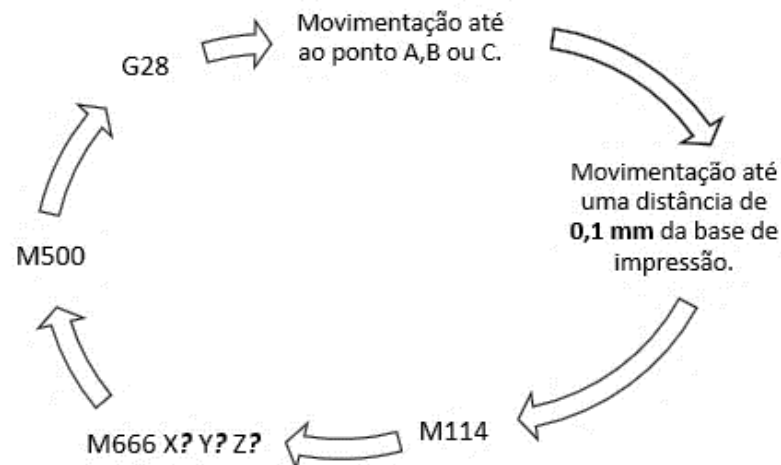


Figura 74 - Ciclo de iteração para calibração do sistema de movimentação.

No fim da calibração dos pontos A, B e C, o extrusor é enviado ao ponto D. Caso a base de impressão não se encontre a uma distância de 0,1 mm do bico de extrusor, seria devido ao facto desta mesma base se encontrar deformada (côncava ou convexa). Posto isto, o sistema de movimentação encontra-se completamente calibrado, aspeto essencial para que os objetos impressos não tenham deformações relativamente aos ficheiros STL que lhe deram origem devido à importância da aderência da primeira camada e para que não se cause empenos nas peças impressas.

No fim da calibração, foi definida uma altura máxima de impressão de 600 mm, o que implica um aumento de 50 mm relativamente à altura máxima que se encontrava definida anteriormente às modificações estruturais efetuadas.

### 3.7.3 Calibração da temperatura da base de impressão e diamond extruder

Ao iniciar os testes de impressão foi notória a falta de adesão do filamento à cama de impressão, e constatou-se que o motor de passo do alimentador que conduzia o filamento até à extrusão oferecia resistência e acabava por não conduzir o filamento. Pelo contrário, a retração era realizada sem problemas, por isso anulou-se a hipótese do problema ser no motor de passo do alimentador. Com isto, optou-se por medir a temperatura do bico extrusor e constatou-se uma diferença de temperaturas a rondar os 20°C entre a temperatura que a impressora indicava e a leitura que o termopar, da Figura 75, realizava.



Figura 75 - Termopar utilizado para calibração de temperaturas.

Isto indicava que o filamento de PLA em vez de estar a ser extrudido a 200°C, estava a ser extrudido a 180°C. Esta diferença de temperaturas é prejudicial à correta extrusão devido aos intervalos de extrusão definidos para cada material com base na sua temperatura de fusão como referido previamente.

Utilizou-se o *Pronterface* para fazer a calibração PID (Proporcional, Integrativo e Derivativo) da temperatura. Por se tratar de uma resistência variável e utilizando um termistor tipo NTC de 100 kOhm encapsulado em vidro, pode ser facilmente medida por um conversor analógico-digital e o seu controlo realizado através de um controlador PID.

Aqueceu-se o extrusor desde a temperatura ambiente até aos 200°C, processo que demorou cerca de 8 minutos. Para se iniciar este processo de aquecimento enviou-se o comando **M303 E0 S200 C2**, que estabeleceu o aquecimento do extrusor até à temperatura de 200°C realizando dois ciclos de aproximação à temperatura estipulado para obtenção dos parâmetros PID.

Após o término da calibração, o *Pronterface* devolveu as constantes da seguinte forma:

**bias: 92 d: 92 min: 196.56 max: 203.75**

**Clasic PID**

**Kp: 42.54**

**Ki: 1.64**

**Kd: 275.98**

**PID Autotune finished!**



De seguida, teve-se que indicar estas mesmas constantes no firmware da impressora através do Arduino em *configurations.h*. Após nova medição a diferença de temperatura após estabilização do diamond extruder variava apenas no máximo 2°C comparativamente com o obtido pela leitura do termopar. De realçar que a temperatura da cama de impressão não apresentava uma variação tão elevada, sendo que com as alterações realizadas apenas alternava 1°C entre a indicação do LCD da impressora e a leitura do termopar.

### 3.8 Impressora 3D Delta obtida após modificações

Através do trabalho prático desenvolvido referenciado, foi possível a obtenção das melhorias pretendidas aquando do estudo da impressora 3D disponibilizada no início da dissertação. De referir que tudo o que foi modificado, teve de algum modo um aproveitamento do trabalho realizado anteriormente a esta dissertação aquando da conceção da impressora 3D. A impressora 3D obtida pode ser visualizada na Figura 76.

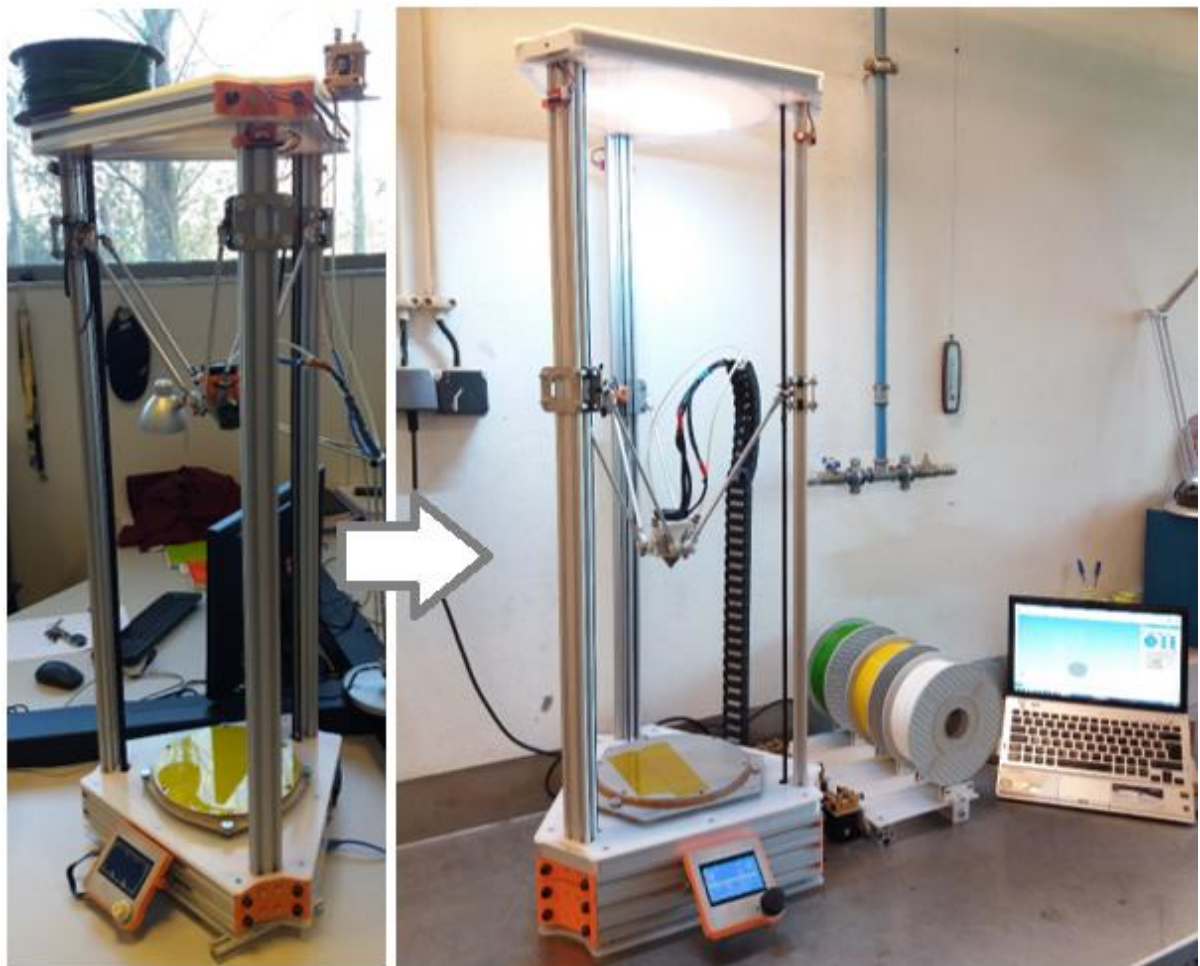


Figura 76 - Impressora obtida depois de efetuadas todas as alterações.

Como complemento da imagem fornecida, encontra-se na Tabela 9 um quadro resumo das melhorias que foram sendo obtidas em cada módulo que foi alvo de alterações. Estas mesmas melhorias foram sendo constatadas, posteriormente, aquando da realização das impressões simultâneas através dos três filamentos de PLA de cor distinta.



Tabela 9 – Quadro resumo das melhorias obtidas em cada módulo

<b>Módulo</b>	<b>Otimizações obtidas</b>
<b>Controlo e comunicação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reorganização do posicionamento das placas do Arduino, da RAMPS 1.4 e da placa de extensão.</li> <li>• Possibilidade de controlo dos três alimentadores de filamento para o <i>Diamond Extruder</i>.</li> <li>• Melhoria na resolução dos motores de passo responsáveis pela movimentação dos carris nas torres XX, YY e ZZ.</li> </ul>
<b>Estrutural e de movimentação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhoria da estabilidade e precisão da impressora através da utilização dos suportes superior e inferior para as três torres.</li> <li>• Reorganização dos fios elétricos e tubos de alimentação diretamente ligados ao extrusor.</li> </ul>
<b>Base de impressão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior facilidade de calibração manual através dos parafusos de ajuste devido à utilização de 3 apoios.</li> <li>• Melhor isolamento térmico da cama de impressão relativamente ao seu suporte.</li> </ul>
<b>Extrusão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade de alimentação dos três filamentos, sem qualquer intervenção por parte do utilizador, através da unidade de alimentação de filamento.</li> </ul>

## 4 Impressão 3D multicolor

O segundo objetivo da presente dissertação é a impressão simultânea a três cores, como se constata na Figura 77. Todas as melhorias efetuadas durante a fase de otimização da impressora estão intrinsecamente relacionadas com a concretização deste objetivo associado a melhores condições inerentes à impressão. É de realçar que o estudo da influência das propriedades da cor do filamento durante a impressão serão encaradas como trabalhos futuros.

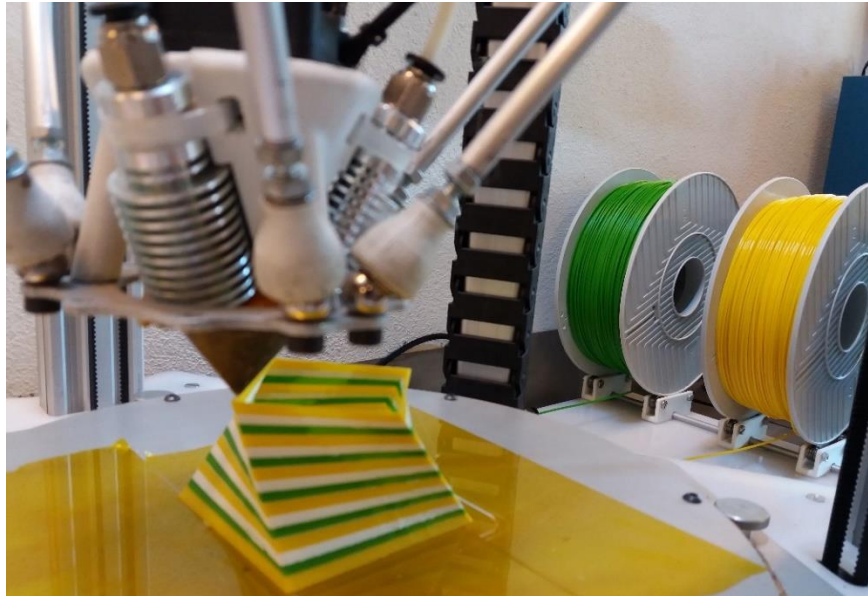


Figura 77 - Realização de uma impressão simultânea de 3 cores.

### 4.1 Alimentação de filamento

A particularidade do *diamond extruder*, como referido, prende-se com a relação entre as três entradas de filamento para uma única saída. Isto leva a que tenham que ser tidos em conta alguns fatores que serão referidos posteriormente.

Devido à geometria do *diamond extruder*, quando se imprime a uma só cor sem que se alimente as outras com filamento (deixando-as livres), leva a que essas mesmas entradas fiquem entupidas devido à solidificação do filamento que está a ser extrudido. Devido à pressão exercida, esse mesmo filamento tende a subir pelas entradas que se encontram livres e não apenas pela saída do bico extrusor. Isto faz com que ao subir até certo ponto onde a temperatura já seja substancialmente mais reduzida, devido aos dissipadores de calores dessas entradas, o filamento volte a solidificar, entupindo essa mesma entrada. Esta geometria do *diamond extruder*, observável na Figura 78, é o motivo pelo qual se verifica este tipo de problema.

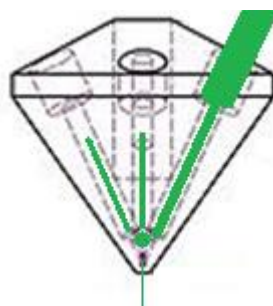


Figura 78 - Impressão a uma só cor utilizando o diamond extruder (adaptado de [19]).

Para contornar esta situação, optou-se pelo seguinte método de alimentação de filamento. Antes de se iniciar o aquecimento do bico extrusor alimenta-se o mesmo com os três filamentos até que o motor do alimentador ofereça alguma resistência. Esta mesma resistência significa que o filamento se encontra no ponto em que para continuar terá que ser fundido para que continue pelo canal de menor diâmetro. Apenas depois de realizar a colocação dos três filamentos a frio, é que se deverá iniciar a impressão. Isto evita problemas de entupimento na impressão a uma só cor, mas também faz com que nas impressões a várias cores qualquer filamento se encontre pronto a ser extrudido a qualquer momento. Na Figura 79 encontra-se um esquema alusivo à explicação referida.

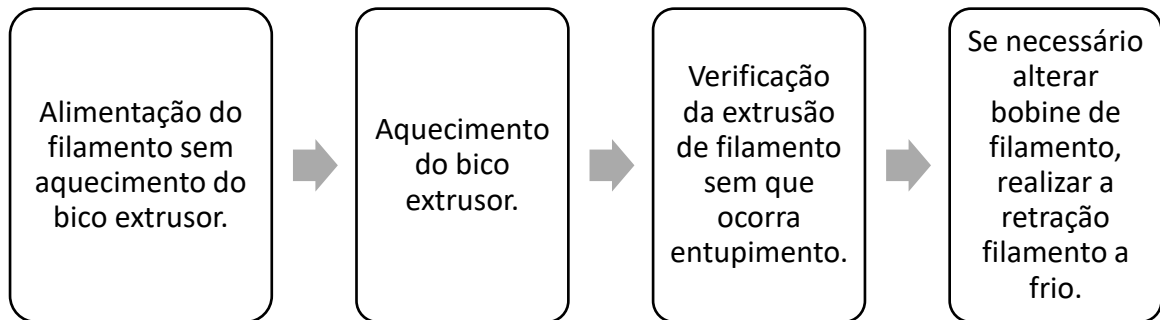


Figura 79 - Esquema para inserção do filamento pronto a ser impresso nas três entradas.

Outro aspeto do *diamond extruder* que surgiu aquando das primeiras impressões, foi a facilidade com que algumas entradas de filamento danificavam mais rapidamente o filamento levando a novos entupimentos das entradas. Constatou-se que na parte em que era feita a ligação roscada entre cada dissipador de calor e o bico extrusor, o diâmetro diminuía para cerca de metade fazendo com que a entrada de filamento a frio fosse muito difícil de ser realizada. Na parte de menor diâmetro, encontrava-se um revestimento em PTFE com espessura de cerca de 0,2 mm, sendo que devido às altas temperaturas verificadas, o revestimento ficava danificado dificultando a passagem do filamento. Esta ligação roscada pode ser observada na Figura 80 a azul.

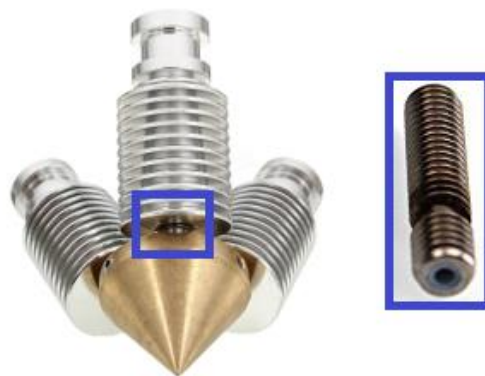


Figura 80 - Ligação roscada entre o dissipador de calor e o *diamond extruder* (adaptado de [37]).

Para que fosse facilitado o processo de inserção do filamento a frio, foi realizada a furação no interior desta mesma entrada que passou a ter um diâmetro interior uniforme de 4,2 mm. Isto permitiu que o tubo de *bowden*, também em PTFE, responsável pela condução do filamento até à entrada *diamond extruder* conseguisse penetrar totalmente por esta entrada. Quando a entrada roscada diminuía de diâmetro, encontrava-se nesse mesmo ponto um tubo de PTFE, muito mais sensível às mudanças de calor devido à sua espessura mais reduzida. A solução encontrada fez com que fosse o mesmo tubo de *bowden* a conduzir o filamento até à

entrada do *diamond extruder* onde o filamento é fundido e posteriormente extrudido. Este mesmo tubo, apresenta uma espessura de aproximadamente 1 mm. Este procedimento encontra-se esquematizado na Figura 81.

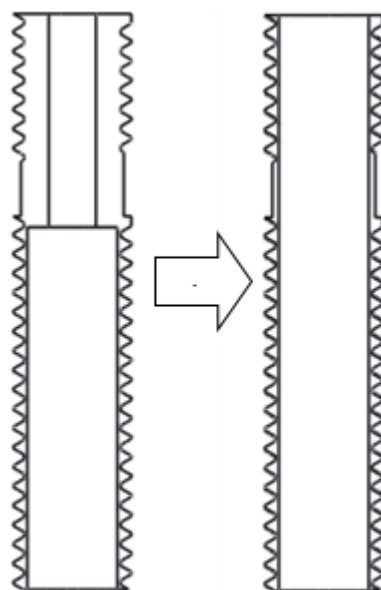


Figura 81 - Vista em corte da mudança efetuada no diâmetro interior da ligação rosca.

#### 4.1.1 Problemas relacionados com a alimentação de filamento

Constatou-se que aquando de uma exposição prolongada do filamento a altas temperaturas no bico extrusor sem que ocorra extrusão leva a que o material que lá se encontra passa de um estado pastoso para um quase líquido, o que é impróprio para que se inicie a impressão. Com isto deve-se ter em conta que ao dar o comando de aquecimento do bico extrusor, a impressão deve-se iniciar não muito após a estabilização da temperatura. Por outro lado, quando se pretende efetuar a limpeza das entradas do *diamond extruder*, após se retirar o filamento a frio deve-se aquecer o bico extrusor para que os resíduos de filamento que ainda se encontram nos canais do bico extrusor, passem ao estado referido anteriormente e escurram pelo orifício do bico extrusor.

Outro problema ocorreu nas ligações rosca entre os dissipadores de calor e do bico extrusor do *diamond extruder*, era possível constatar a existência de fuga de filamento devido às pressões de entrada do filamento exercidas. Este mesmo filamento deveria sair na totalidade pelo bico extrusor, levando a que houvesse falta de material aquando de algumas passagens de impressões por este mesmo ter saído pela ligação rosca. Para contornar este problema revestiu-se a rosca com fita de PTFE da marca *TBA*, para que no momento do aperto da rosca, este mesmo material preenche-se os vazios e assim impede-se o vazamento de PLA extrudido necessário à impressão. Este problema pode ser visualizado na Figura 82, em que se constata as marcas do escurrimento do material pela parte exterior do bico extrusor.



Figura 82 - Fuga de filamento associado às ligações roscadas.

Pode ainda ser referido que para verificação do comprimento de filamento a ser extrudido, foi enviado o comando para que cada alimentador fornecesse 100 mm de filamento para posterior extrusão. Através deste método, tornou-se possível verificar que este mesmo comprimento pode não ser exato, como é possível comprovar através das medições efetuadas, representadas na Figura 83.

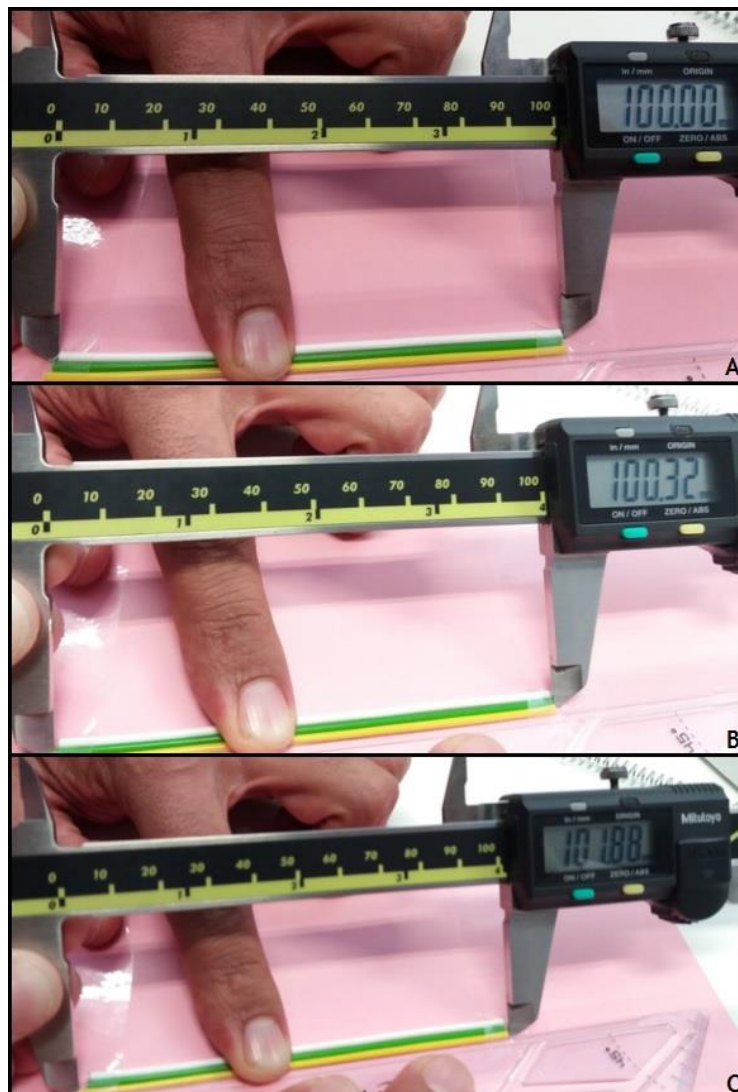


Figura 83 - Medições do comprimento do filamento após alimentação.



Constata-se que nas medições B e C, respetivamente do filamento verde e amarelo, a quantidade de filamento que se fornece para extrusão foi superior à pretendida. Este problema pode estar associado a uma calibração imperfeita dos *drives* dos motores de passos dos alimentadores, ao escorregamento ao longo da engrenagem condutora, à presença de uma força de atrito inconstante ao longo do percurso do filamento pelo tubo de *bowden* ou à força exercida pelo parafuso de ajuste para que o filamento seja guiado pela engrenagem condutora. Para resolução deste tópico, procedeu-se à verificação da calibração que foi mencionada previamente no tópico 3.7.1.

De realçar que se o problema fosse devido ao escorregamento do material na engrenagem condutora do alimentador ou às forças de atrito referidas, o comprimento do filamento fornecido estaria em défice com o valor que havia sido pretendido [38].

Por último, verificou-se a força que os parafusos de ajuste estariam a exercer e reajustaram-se estes apertos em comparação com o que estava a ser exercido pelo parafuso no alimentador do filamento branco (da qual se obteve o valor exato de 100 mm de filamento). Com estas modificações, o filamento que passou a ser fornecido passou a apresentar valores exatos nas medições efetuadas com base no comprimento do filamento dos três alimentadores. A unidade de ajuste do alimentador, é composta pelo parafuso de ajuste, dois parafusos de fixação e uma mola. O parafuso de ajuste é o que se encontra na parte superior do alimentador, através do qual se controla a força de aperto exercida pela mola como é observável na Figura 84.

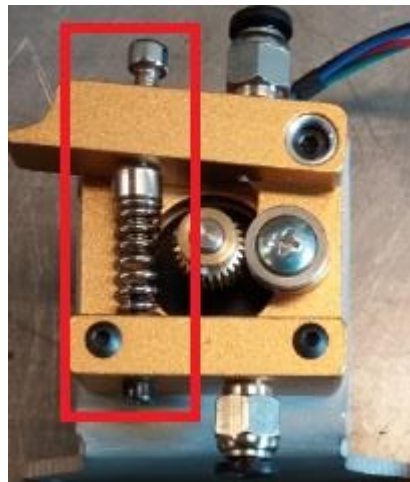


Figura 84 - Unidade de ajuste do alimentador de filamento.

## 4.2 Método de impressão simultânea de 3 cores

### 4.2.1 Mudança de cor associada à alteração da altura de impressão

Para a impressão simultânea de três cores, começou-se por testar objetos de fácil impressão. Inicialmente, fez-se a divisão de um ficheiro CAD em vários STL para que fosse possível associar cada STL a um alimentador e consequentemente a uma cor. Como exemplo, começou-se pela impressão de um quadrado de 30 mm por 30 mm, altura de 14 mm e espessura de 1 mm. A imagem CAD encontra-se representada na Figura 85.

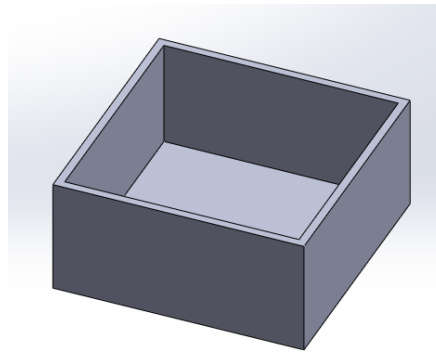


Figura 85 - Peça teste para alteração de cor por camada.

De seguida, dividiu-se o objeto CAD em três partes, cada parte correspondente a uma cor como será explicado adiante, para posterior gravação como STL de cada parte. Optou-se pela alteração de cor a 1 mm. Esta divisão encontra-se explícita na Figura 86.

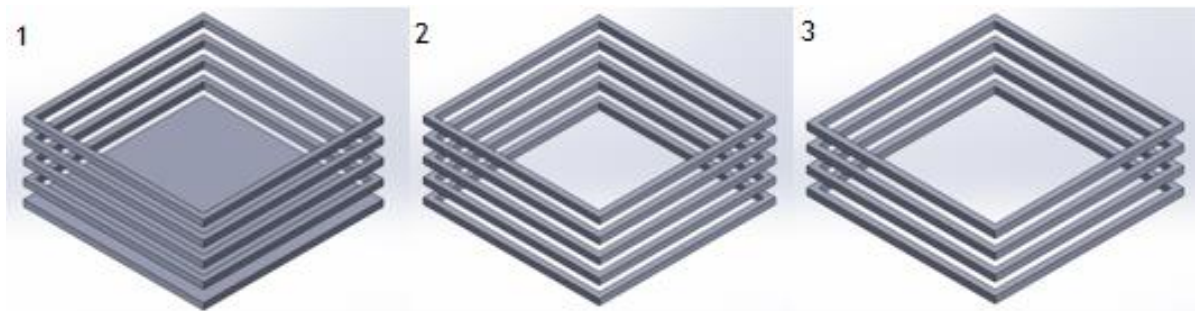


Figura 86 - Divisão do objeto CAD por diferentes ficheiros STL.

Através do *Repetier-Host*, carregaram-se os três ficheiros STL e fez-se o *assembly* dos mesmos. Este último poderia ser realizado diretamente no *SolidWorks* e gravado como STL, sendo desta forma apresentado os três ficheiros separadamente para posterior inserção no *Repetier-Host*. A cada ficheiro STL associa-se um alimentador da impressora, podendo desde logo associar-se também a cor do filamento desse mesmo alimentador para se poder ficar com uma ideia do aspeto final da peça a ser impressa. Esta mesma parte do processo pode ser visualizada na Figura 87.

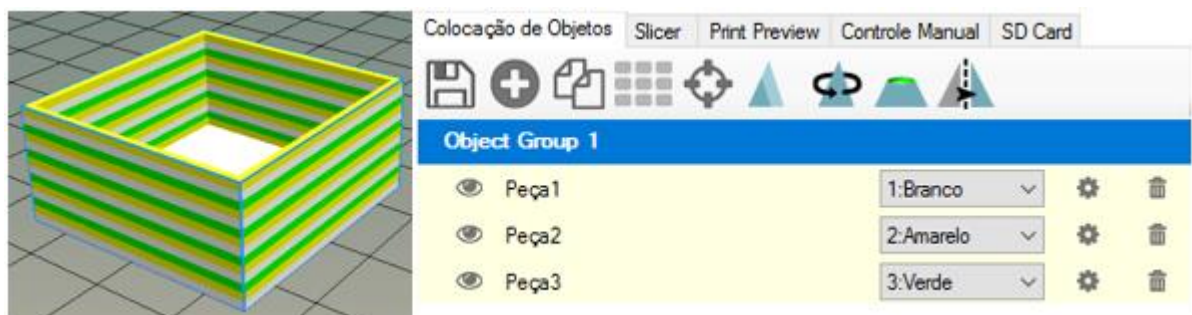


Figura 87 - Utilização do *Repetier-Host* para definição da cor a ser impressa.

Posteriormente optou-se pela utilização do *Slic3r* para gerar o *g-code* que é enviado para a impressora através da ligação USB. Tanto na utilização do *Repetier-Host* como do *Slic3r*, os parâmetros da impressora têm que estar referidos aquando da criação do *g-code*.



Em suma, os parâmetros são os seguintes:

- Quantidade de extrusores/alimentadores;
- Volume de impressão;
- Material a ser utilizado e respetivo diâmetro de filamento;
- Temperatura do bico extrusor;
- Temperatura da base de impressão;
- Altura de camada;
- Velocidades de impressão (realce para as velocidades de retração do material, importante durante a transição de cores);
- Distância de retração do filamento;
- Percentagem e forma de enchimento.

O esquema simplificado do procedimento a ser efetuado encontra-se representado na Figura 88.

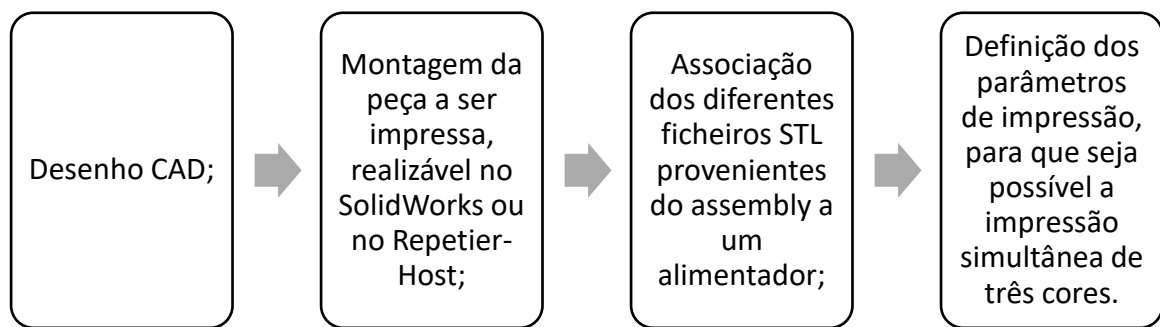


Figura 88 - Procedimento a efetuar para impressão de uma peça utilizando várias cores de filamento.

Através do Slic3r, é importante realçar as velocidades de impressão. Após vários testes, chegou-se à conclusão que uma velocidade impressão aproximada de 40 mm/s seria o ideal para este tipo de impressão, sendo que esta mesma velocidade poderia variar tanto na impressão da primeira camada para melhor adesão à base de impressão e na última camada para um melhor acabamento superficial. Durante a variação de cor dentro da mesma camada, apresentaram-se alguns problemas devido aos diferentes comportamentos a nível de fluidez dos filamentos utilizados. A velocidade de movimentação sem impressão convém ser mais elevada, a rondar os 60 mm/s para que não se extruda material durante esse mesmo movimento.

De referir que ao haver uma única saída para três entradas, o movimento de retração do filamento a deixar de ser impresso para que outro filamento comece a ser extrudido assume elevada importância. Depois de vários estudos da geometria do *diamond extruder* a ser utilizado definiu-se 0,5 mm de retração do filamento sempre que havia troca de filamento. Isto reduz e quase que anula a mistura de cor entre os filamentos que foram alternados por camadas durante a impressão. O mesmo não sucede com a alteração de cor dentro do mesmo nível de camada, devido aos diferentes comportamentos a nível de fluidez dos filamentos utilizados. O facto de não anular completamente prende-se com o facto da câmara à saída do bico extrusor ter cerca de 5 mm<sup>2</sup>, o que faz com que exista sempre um pouco de filamento extrudido a ser misturado durante a troca.

Por fim, o *Slic3r* indica as estatísticas de impressão, como o tempo total de impressão, a quantidade de camadas (que está relacionada com a altura de camada que se seleciona) e o

filamento total que vai ser utilizado durante a impressão. Estas mesmas estatísticas podem ser constatadas na Figura 89.

Printing Statistics	
Estimated Printing Time:	49m:18s
Layer Count:	138
Filament needed:	1273 mm

Figura 89 - Estatísticas de impressão fornecidas pelo *Slic3r*.

Finalmente, obtém-se a peça impressa referente à explicação acima descrita como é possível constatar na Figura 90.

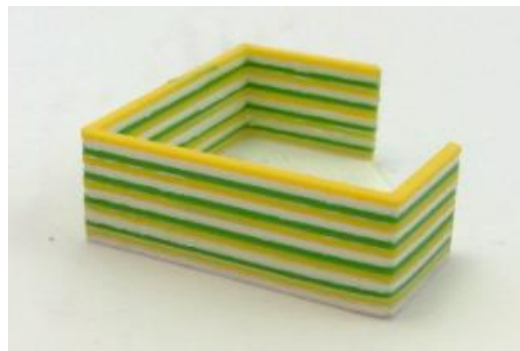


Figura 90 - Peça obtida através da alteração de cor por camada.

Depois de inúmeros testes conclui-se que a velocidade de impressão podia variar entre 25 mm/s até 40 mm/s, sendo que a espessura do material impresso em nada influenciava a qualidade de adesão entre as mudanças de cor, quando estas alternavam consoante a camada de impressão. Estes mesmos testes foram realizados com a análise de peças impressas como a que se encontra representada na Figura 91, em que a cor variava de 2 mm em 2 mm.

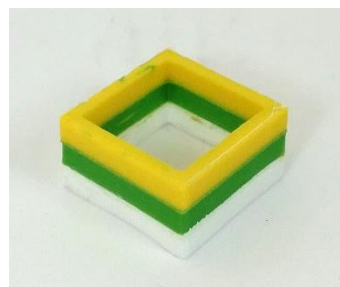


Figura 91 - Peça simples para estudo da influência da velocidade de impressão.

De referir que ao mencionar que foram utilizadas alturas de camada de 0,1 mm não se tem em conta a primeira camada. A altura da primeira camada, por definição do *Slic3r*, tende a ser 0,35 mm visto que esta maior largura permite que a peça adira melhor à cama de impressão, fator essencial para uma boa precisão dimensional e ausência de defeitos da peça impressa. O valor de 0,1 mm está associado à melhor resolução da peça ao longo da sua impressão. O *Slic3r* efetua automaticamente estes cálculos para a altura de camada com base nos dados fornecidos ao software, entre os quais o diâmetro do filamento e orifício do bico extrusor [39].

É de realçar que a velocidade de impressão utilizada foi uniforme para todas as situações, à exceção da velocidade do movimento sem impressão. Isto porque através do *Slic3r* é possível definir velocidades diferentes para várias situações. Pode ser definida uma velocidade para a impressão de material do perímetro da peça, isto para que a resolução na parte exterior da peça seja mais precisa através de uma velocidade de impressão mais reduzida. Pode ainda ser indicada uma velocidade de impressão mais rápida para os enchimentos devido à particularidade de o enchimento não necessitar de uma ótima resolução. Estas mesmas velocidades de impressão podem ser modificadas ao longo da impressão através do comando do *feedrate*, tanto no *firmware* como no *software* a ser utilizado para controlo da impressão. Este mesmo comando é apresentado em percentagem e ao ser modificado, por exemplo para 120%, aumenta em 20% todas as velocidades definidas no código g.

#### 4.2.2 Mudança de cor dentro da mesma camada de impressão

Uma outra forma de impressão, utilizando três filamentos com cores distintas, passa pela mudança de cor dentro do mesmo nível de camada de impressão. O método seguido foi similar ao abordado anteriormente. Ao invés de dividir o objeto CAD por camadas, a divisão do mesmo ficheiro é feita para que haja alturas de camada do objeto pertencentes a vários ficheiros STL obtidos. Para testar esta mesma solução pelo método acima descrito foi obtida a peça da Figura 92.



Figura 92 - Peça obtida através da alteração de cor dentro da mesma altura de camada.

Constatou-se que na mudança de cor na mesma altura de camada, seria necessário realizar alguns testes relativamente às velocidades de impressão utilizadas, retração de filamento e espessuras dos materiais a ser impressos. Estes três parâmetros terão que ser variados para que se possa perceber a influência de cada um deles.

Foi realizado um protocolo de testes de impressão que consistia na impressão de um triângulo, como se verifica na Figura 93.

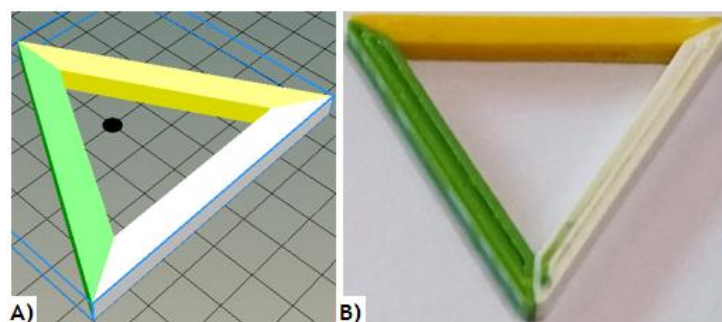


Figura 93 - Triângulo impresso para estudo do comportamento do filamento na mudança de cor na mesma camada.

Variou-se a velocidade de impressão, a espessura da peça e o comprimento da retração de filamento. A análise de resultados poderá ser constatada na Tabela 10.

Tabela 10 – Influência de alguns parâmetros na mudança de cor

Parâmetro	Influência
<b>Velocidade de impressão</b>	Necessária uma velocidade mais reduzida, a rondar os 20 mm/s para que a mudança de cor seja realizada com o mínimo de mistura de cor, e que exista uma correta continuidade nos locais de mudança de cor.
<b>Espessura da peça</b>	Quanto maior a espessura, melhor a definição variação da cor nesse nível de camada, visto que com uma maior espessura a impressão de uma cor em cada camada é mais prolongada e permite que cada cor estabilize.
<b>Retração de filamento</b>	Não influenciava a qualidade, visto que o problema se encontra no filamento que já se encontra aquecido junto da saída do bico extrusor, levando à mistura de filamento na transição de cor.

Em suma, é possível constatar a necessidade de realizar um sistema de purga para que quando haja mudança de cor, o resto de filamento que já se encontra aquecido seja extrudido para uma purga e que assim a impressão continue quando a nova cor já se encontre a ser extrudida sem mistura com a cor anterior. Este sistema de purga será apresentado como trabalho futuro a ser realizado, e poderá ser realizado através da colocação de um reservatório num local específico da impressora e aquando da mudança de cor seja programada a movimentação do bico extrusor para uma posição acima do reservatório e que ocorra extrusão durante um tempo estipulado até estabilização da nova cor, para que a impressão do objeto continue. Isto fará com que os tempos de impressão aumentem, mas faria com que a mudança de cor não causasse qualquer tipo de problema em relação à aderência, à cor, ao acabamento e à continuidade da peça impressa.

Outro fator a ter em conta passa pelo diferente comportamento dos diferentes filamentos ao nível da sua fluidez e viscosidade, o que é notável na qualidade do enchimento de cada uma das cores. Na Figura 93 é possível constatar uma melhor qualidade de enchimento na extrusão do filamento PLA de cor amarela. Como trabalho futuro, seria interessante o estudo das propriedades da cor no comportamento do filamento aquando da sua extrusão e temperaturas ideais nas quais a mesma ocorre [40].

Outra forma de impressão aproveitando a componente tricolor da unidade de alimentação do filamento e do diamond extruder, é o envio do ficheiro *STL* completo para o *Repetier-Host*, *Slic3r* ou *Cura* e através do *Pronterface* ou do *Repetier-Host* alterar o alimentador a ser utilizado fazendo com que as alterações da cor sejam realizadas ao longo da impressão sem estarem previamente definidas no código g. Estas mesmas alterações podem também ser previamente definidas aquando do início da impressão, para que ocorram em intervalos de tempo bem definidos.

### 4.3 Peças obtidas através de impressão 3D

Após estudo dos testes de impressão realizados e problemas inerentes, foi possível a impressão de peças com maiores dimensões e complexidade geométrica mais elevada.

Como exemplo, serão referidas algumas das peças que foram possíveis obter aquando da finalização do trabalho prático.

Pelo método referido previamente, foi desenvolvida uma estrutura similar a um paralelepípedo contorcido para posterior impressão. Na Figura 94, é possível constatar a impressão deste mesmo objeto com uma espessura de 0,75 mm, altura de 60 mm e lado da base de 40 mm.

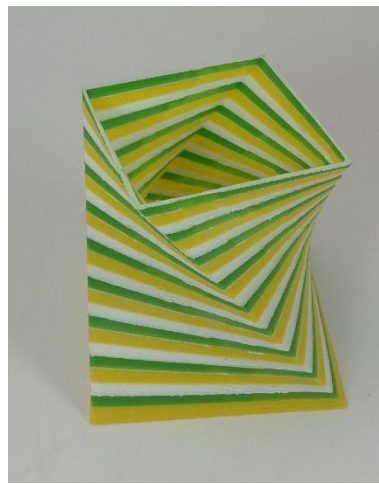


Figura 94 - Recipiente impresso.

Para obtenção de um suporte para canetas, aumentou-se a espessura do objeto para 2 mm e procedeu-se a um aumento da altura para 80 mm. O objeto final obtido pode ser observado na Figura 95.



Figura 95 - Suporte para canetas impresso.

De seguida, realizou-se a impressão de um suporte para telemóvel, com o qual fosse possível o carregamento da bateria do telemóvel. O objeto apresenta uma altura de 105 mm, largura de 80 mm e espessura de 3 mm. Este mesmo suporte para telemóvel pode ser observado na Figura 96.

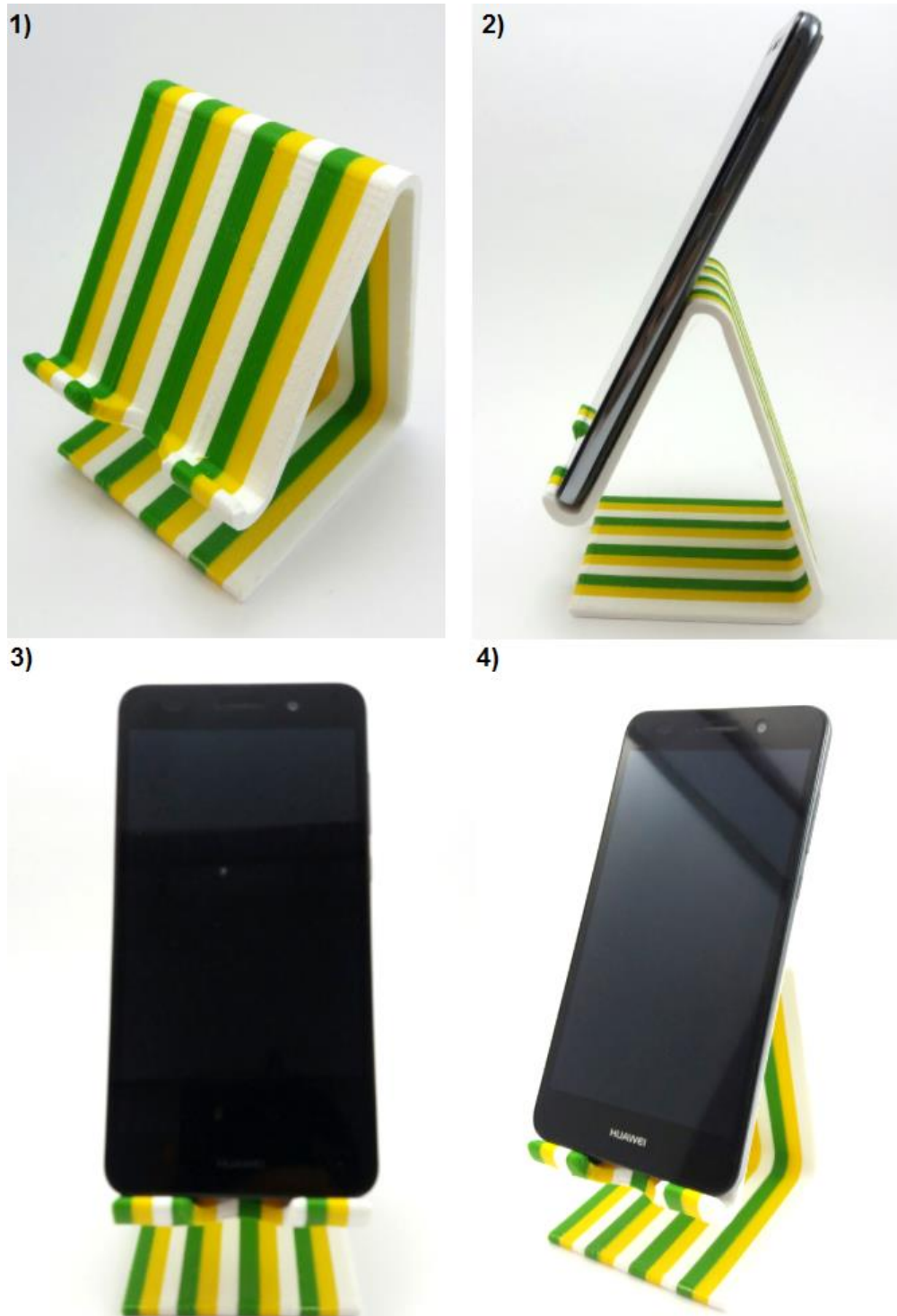


Figura 96 - Suporte para telemóvel impresso.



Uma das vantagens da impressora 3D do tipo Delta otimizada é a possibilidade de impressão de peças de grandes dimensões, principalmente ao nível da altura, uma vez que o volume de impressão permite obtenção de peças até 600 mm. Na Figura 97, é possível observar o recipiente em que os lados têm a dimensão de 100 mm, a altura é de 300 mm e a espessura de 1 mm. Este recipiente pode servir para caixote do lixo ou até para servir de jarra.

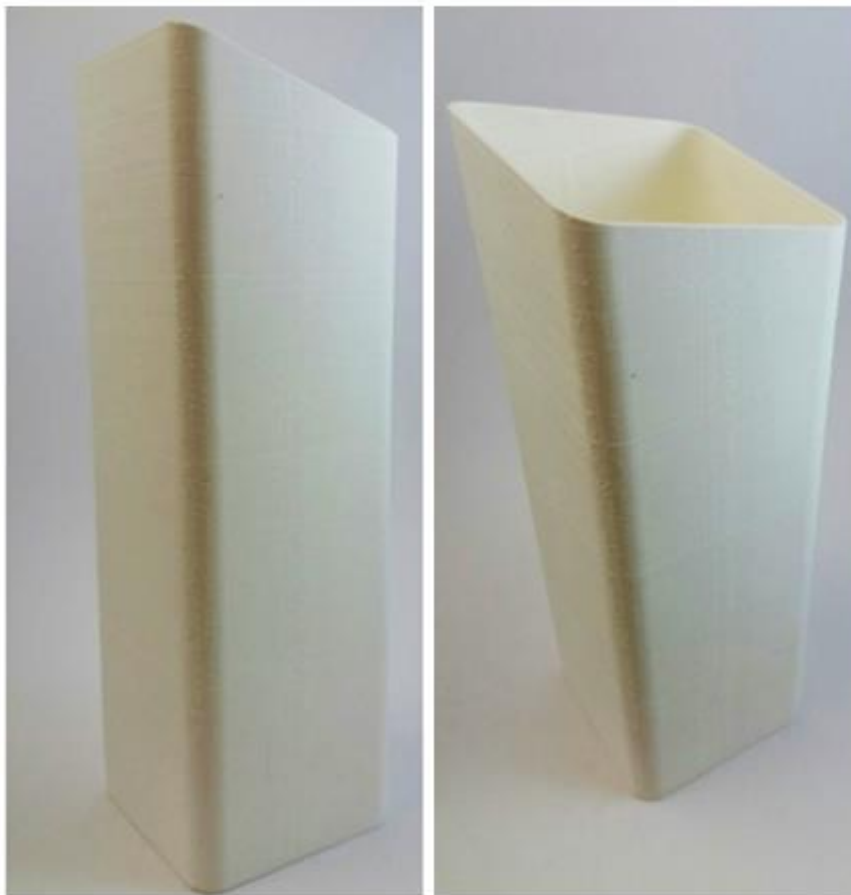


Figura 97 - Recipiente impresso a uma só cor.

Na Figura 98, é possível observar a parte inicial do mesmo recipiente impresso através da alternância entre o branco e o amarelo.



Figura 98 - Recipiente impresso com alternância de cor.

## 5 Conclusões

Este trabalho consistiu na otimização da impressora 3D do tipo Delta, previamente desenvolvida no LDPS, com o objetivo final de impressão a várias cores a ser atingido com sucesso.

As alterações no módulo de controlo e comunicação da impressora permitiram a possibilidade da impressão a três cores, um aumento da resolução dos eixos de movimentação e garantir uma produção de peças geometricamente complexas, uma vez que melhorou a capacidade dos movimentos sincronizados associados à cinemática delta. Tais benefícios foram devido à implementação de *drives* com maior capacidade de corrente e resolução complementado com as alterações efetuadas no firmware.

A reorganização dos componentes elétricos na base inferior da impressora facilitou a acessibilidade e melhorou as condições para manutenção e futuras melhorias no módulo de controlo da máquina. Através do levantamento da base do suporte da cama de impressão é possível aceder aos componentes elétricos da impressora.

O desenvolvimento de suportes maquinados em alumínio, para fixação das três torres associadas a cada eixo, melhorou substancialmente a estabilidade da impressora em comparação com a registada nos suportes em PLA, reduzindo-se assim as vibrações e garantindo a verticalidade e paralelismo das torres dos três eixos.

Quanto à base de impressão, obteve-se uma melhoria expressiva na facilidade de ajuste manual do suporte da cama de impressão através da implementação em três apoios em comparação com os quatro apoios que se encontravam inicialmente na impressora. Esta implementação encontra-se em conformidade com os tradicionais sistemas de nivelção na área da metrologia.

A substituição do isolamento térmico da cama de impressão permitiu que a sua nivelção não fosse afetada devido a distorções térmicas como se constatava através da anterior utilização de madeira como isolante.

A criação de uma unidade de filamento permitiu satisfatoriamente a alimentação de três filamentos durante longos períodos, realizando-se de forma independente, permitindo impressões autónomas durante períodos longos.

Quanto à impressão multicolor realizada, o objetivo foi atingido. A transição de cores ocorreu sem qualquer tipo de problema para a integridade final da peça. Os parâmetros de impressão como o comprimento e velocidade de retração do filamento permitiram uma redução da mistura de filamento das várias cores aquando da extrusão. Os resultados foram mais satisfatórios quando ocorria transição da cor em simultâneo com a mudança da altura de camada, ao invés da alteração de filamento dentro da mesma camada devido à mistura indesejável de cores.

A altura de camada mínima testada foi de 0,1 mm, com a qual se obteve um bom acabamento superficial. Foram ainda testadas impressões com alturas de camada de 0,3 mm para reduzir substancialmente o tempo de impressão com resultados satisfatórios.

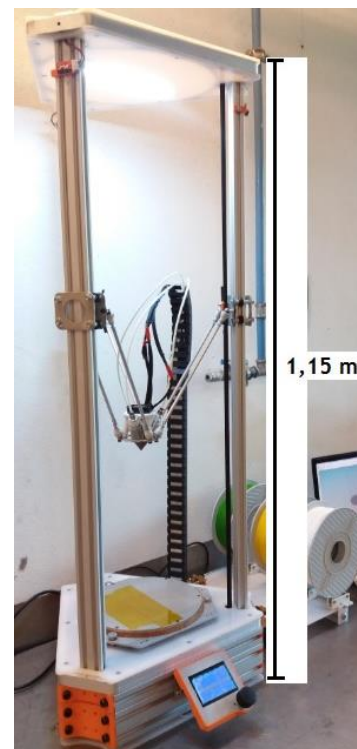
Constatou-se que velocidades de impressão no intervalo de 20 mm/s a 45 mm/s permitiram efetuar as transições de cor adequadamente. Foi necessária a redução das velocidades para o nível mais reduzido deste intervalo quando a transição de cor se realizava dentro da mesma camada.

As limitações do *diamond extruder* levam a que o processo de transição entre extrusão de diferentes cores de filamento ainda possa ser melhorado devido à mistura indesejável de resíduos de filamentos que haviam sido extrudidos previamente. Para contornar este problema, deverá ser realizado um sistema de purga.

Comprovou-se a possibilidade de realizar impressões com três cores em simultâneo através da utilização de *softwares CAM open-source* e do *diamond extruder*.

De seguida, apresenta-se um quadro resumo com as principais especificações da impressora após finalização desta dissertação.

<b>Volume de impressão</b>	Ø200x600mm
<b>Materiais disponíveis para impressão</b>	PLA
<b>Diâmetro do filamento</b>	1,75 mm
<b>Diâmetro do bico extrusor</b>	0,4 mm
<b>Resolução de camada</b>	100 µm
<b>Conectividade</b>	USB e cartão SD
<b>Eletrónica</b>	<i>Marlin Firmware</i> (Arduíno)
<b>Velocidade máxima de impressão</b>	60 mm/s
<b>Velocidade de impressão multicolor</b>	20 – 40 mm/s
<b>Temperatura máxima do extrusor</b>	260°C
<b>Temperatura máxima da cama de impressão</b>	100°C
<b>Número de Alimentadores de filamento</b>	3



## 6 Trabalhos futuros

Como continuação do trabalho desenvolvido ao longo da dissertação, propõe-se algumas tarefas para aproveitamento do trabalho já realizado.

As características principais da impressora passam pela possibilidade de impressão de peças com uma altura elevada, até 600 mm e impressão de três cores em simultâneo. A prioridade passa pelo estudo do material a ser impresso, dado que após finalização da otimização da impressora, realizaram-se impressões com peças de tamanho reduzido para que se pudesse obter resultados de impressão num tempo mais reduzido. O material disponível para impressão deverá estar isolado num ambiente com a temperatura e humidade controlável para que não se danifiquem as propriedades mecânicas do filamento.

Outro aspeto a ser explorado passa pela caracterização e análise do funcionamento do extrusor. Nesta análise poderão ser feitas impressões de peças com diferentes cores ou materiais, explorando as suas funcionalidades de mistura de cores para obtenção de gradientes. A utilização do método RGB de mistura de cor seria ideal pela possibilidade de obtenção de múltiplas cores através da utilização de apenas três bobines de filamento (vermelho, verde e azul).

Devido aos tempos de impressão elevados seria oportuna a colocação de uma câmara de vídeo para controlo da impressão sem que haja necessidade de estar próximo da máquina.

Foram apenas realizadas impressões com PLA, mas seria interessante o isolamento do volume de impressão através de painéis laterais para posterior colocação de sensores de temperatura. Isto faria com que fosse possível realizar impressão de matérias com elevada distorção térmica como o ABS ou HIPS.

Por fim, para controlo da energia despendida ao longo de cada impressão, poderia ser utilizado um sistema de monitorização à entrada da energia elétrica da impressora.

Em suma, apresentam-se de seguida os diferentes tópicos plausíveis como continuação do trabalho já desenvolvido.

- Modificação do *lay-out* no interior da base inferior da impressora, principalmente a disposição da fonte de alimentação devido à proximidade com as ligações eletrónicas. Ou seja, colocação do módulo de energia ao lado da base inferior da impressora;
- Adição de uma proteção à unidade de alimentação de filamento como método de controlo da temperatura e humidade para que se consiga manter as propriedades do material inalteradas;
- Criação de um ambiente controlado da temperatura dentro do volume de impressão para que seja possível a impressão de outros materiais além do PLA;
- Realização de um sistema de realimentação de posicionamento da máquina ao longo das impressões, para que os ajustes não sejam apenas realizados pelos fins de curso e no início do processo, mas em modo contínuo;
- Estudo da influência da cor do filamento nas propriedades químicas, moleculares e térmicas do material para averiguar o modo como afetam os parâmetros de impressão;
- Estudo da resistência entre camadas na transição de cor através de ensaios mecânicos, como por exemplo, ensaio de flexão;
- Estudo de análise de cor por espectrografia;
- Análise térmica do bico extrusor visando a otimização do processo de deposição e transição do material.

## Referências

- [1] I. Gibson, D. Rosen, e B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*. 2015.
- [2] W. Koff e P. Gustafson, «3D Printing and the Future of Manufacturing», *CSC Lead. Edge Forum*, n. June, pp. 1–11, 2012.
- [3] RepRap, «RepRap», 2017. [Online]. Disponível em: <http://reprap.org/>. [Acedido: 01-Mar-2017].
- [4] Wholers Associate, «Wholers Report 2015», 2015. [Online]. Disponível em: <https://wholersassociates.com/blog/2016/01/popularity-of-fdm/>. [Acedido: 20-Fev-2017].
- [5] S. G. González, *Impresión 3D*. 2016.
- [6] RepRap, «Fused Filament Fabrication», 2016. [Online]. Disponível em: [http://reprap.org/wiki/Fused\\_filament\\_fabrication](http://reprap.org/wiki/Fused_filament_fabrication). [Acedido: 03-Mar-2017].
- [7] C. Duran, V. Subbian, M. T. Giovanetti, J. R. Simkins, e F. R. Beyette Jr., «Experimental desktop 3D printing using dual extrusion and water-soluble polyvinyl alcohol», *Rapid Prototyp. J.*, vol. 21, n. 5, pp. 528–534, 2015.
- [8] Stratasys, *FDM for Composite Tooling*. 2016.
- [9] A. Abilgazyev, T. Kulzhan, N. Raissov, M. H. Ali, W. L. K. O. Match, e N. Mir-Nasiri, «Design and development of multi-nozzle extrusion system for 3D printer», *2015 4th Int. Conf. Informatics, Electron. Vision, ICIEV 2015*, pp. 3–7, 2015.
- [10] C. Bell, *3D printing with delta printers*. 2015.
- [11] WASP, «WASP's Big Delta 3D printer has potential to build insect-repelling houses». [Online]. Disponível em: <http://www.3ders.org/articles/20150914-wasp-big-delta-3d-printer-has-potential-to-build-insect-repelling-houses.html>. [Acedido: 04-Fev-2017].
- [12] T. Freitas, «Desenvolvimento de uma impressora FDM tipo delta», 2017.
- [13] Delta Printer Experience, «Pintstein», 2017. [Online]. Disponível em: <https://pintstein.wordpress.com/2016/01/22/delta-printer-experience/>. [Acedido: 01-Mar-2017].
- [14] T. C. Okwuosa, B. C. Pereira, B. Arafat, M. Cieszyńska, A. Isreb, e M. A. Alhnan, «Fabricating a Shell-Core Delayed Release Tablet Using Dual FDM 3D Printing for Patient-Centred Therapy», *Pharm. Res.*, n. 1, 2016.
- [15] 3D Printer Prices, «Dual Extruder 3D Printers – What you need to know», 2017. [Online]. Disponível em: <http://www.3dprinterprices.net/dual-extruder-3d-printers-what-you-need-to-know/>. [Acedido: 17-Mar-2017].
- [16] KICKSTARTER, «The Diamond Hotend - Single nozzle multi-color 3D printing», 2017. [Online]. Disponível em: <https://www.kickstarter.com/projects/wr3d/the-diamond-hotend-single-nozzle-multi-color-3d-pr>. [Acedido: 25-Fev-2013].
- [17] 3D Printer Online Store, «Best 3D Delta Printer Kit», 2017. [Online]. Disponível em: <https://www.3dprintersonlinestore.com/product/delta/delta-3d-printer-kit>. [Acedido: 01-Mar-2017].
- [18] Geeetech, «Geeetech Rostock 301 mix color 3D Printer», 2017. [Online]. Disponível em: [http://www.geeetech.com/wiki/index.php/Geeetech\\_Rostock\\_301\\_mix\\_color\\_3D\\_printer](http://www.geeetech.com/wiki/index.php/Geeetech_Rostock_301_mix_color_3D_printer). [Acedido: 01-Mar-2017].

- [19] RepRap, «The Diamond Hotend - Single nozzle multi-color 3D printing». [Online]. Disponível em: <https://www.kickstarter.com/projects/wr3d/the-diamond-hotend-single-nozzle-multi-color-3d-pr>. [Acedido: 14-Mar-2017].
- [20] RepRap, «Diamond Hotend», 2017. [Online]. Disponível em: [http://reprap.org/wiki/Diamond\\_Hotend](http://reprap.org/wiki/Diamond_Hotend). [Acedido: 14-Mar-2017].
- [21] A. Rengevič, M. Fúra, e N. Čuboňová, «Analysis of Printing Parameters for Production of Components With 3D Easy Maker Printer», *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 10, n. 32, pp. 1–8, 2016.
- [22] S. Aranda, «Complete PLA Profile Print Settings», 2015. [Online]. Disponível em: <http://www.sd3d.com/pla-settings/>. [Acedido: 08-Mar-2017].
- [23] Simplify 3D, «Rafts, Skirts and Brims», 2017. [Online]. Disponível em: <https://www.simplify3d.com/support/articles/rafts-skirts-and-brims/>. [Acedido: 09-Mar-2017].
- [24] J. De Ciurana, L. Serenó, e È. Vallès, «Selecting process parameters in RepRap additive manufacturing system for PLA scaffolds manufacture», vol. 5, pp. 152–157, 2013.
- [25] All3DP, «30 types of 3D Printer Filaments», 2017. [Online]. Disponível em: <https://all3dp.com/best-3d-printer-filament-types-pla-abs-pet-exotic-wood-metal/>. [Acedido: 10-Mar-2017].
- [26] A. Balsa, «A Bowden extruder, an E3D clone hotend, and cooling fans», 2015. [Online]. Disponível em: <http://deltasteel3dprinter.blogspot.pt/2015/04/a-bowden-extruder-e3d-clone-hotend-and.html>. [Acedido: 03-Fev-2017].
- [27] H. Lipson e M. Kurmamb, *FABRICATED - The new world of 3D Printing*. 2013.
- [28] Granta Design, «CES EduPack». 2017.
- [29] A. Q. Pan, Z. F. Huang, R. J. Guo, e J. Liu, «Effect of FDM Process on Adhesive Strength of Polylactic Acid(PLA) Filament», *Key Eng. Mater.*, vol. 667, pp. 181–186, 2015.
- [30] DoWire, «DoWire - Printer Filaments», 2017. [Online]. Disponível em: [www.dowire.pt](http://www.dowire.pt). [Acedido: 10-Mar-2017].
- [31] K. Takagishi e S. Umezu, «Development of the Improving Process for the 3D Printed Structure», *Sci. Rep.*, vol. 7, n. January, p. 39852, 2017.
- [32] MatterHackers, «High Impact Polystyrene (HIPS) Dissolvable Filament - 1.75mm», 2017. [Online]. Disponível em: <https://www.matterhackers.com/store/3d-printer-filament/hips-175mm-1kg>. [Acedido: 09-Mar-2017].
- [33] E. Canessa, C. Fonda, e M. Zennaro, *Low - Cost 3D Printing*. 2013.
- [34] RepRap, «Power Supply». [Online]. Disponível em: [http://reprap.org/wiki/Power\\_Supply](http://reprap.org/wiki/Power_Supply). [Acedido: 03-Fev-2017].
- [35] RepRap, «Ramps 1.4», 2017. [Online]. Disponível em: [http://reprap.org/wiki/RAMPS\\_1.4](http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4). [Acedido: 20-Mar-2017].
- [36] Marlin Firmware, «Configuring Marlin - Marlin 3D Printer Firmware», 2017. [Online]. Disponível em: <http://marlinfw.org/docs/configuration/configuration.html>. [Acedido: 26-Mar-2017].
- [37] Ali Express, «Diamond Hotend nozzle parts». [Online]. Disponível em: [https://www.aliexpress.com/price/prusa-i3-nozzle-parts\\_price.html](https://www.aliexpress.com/price/prusa-i3-nozzle-parts_price.html). [Acedido: 05-Fev-2017].



- [38] C. S. Netto, C. Bonin, L. Santana et al, «Avaliação de parâmetros de processamento de PLA na produção de peças em impressora 3D», p. 2015, 2016.
- [39] J. C. Steuben, A. P. Iliopoulos, e J. G. Michopoulos, «Computer-Aided Design Implicit slicing for functionally tailored additive manufacturing», *Comput. Des.*, vol. 77, pp. 107–119, 2016.
- [40] L. Santana, C. H. Ahrens, G. Mariz, B. De Oliveria, U. Federal, e D. S. Catarina, «Avaliação da composição química e das características térmicas de filamentos de PLA para impressoras 3D de código aberto.», 2014.

## ANEXO A: Diagrama de Gantt

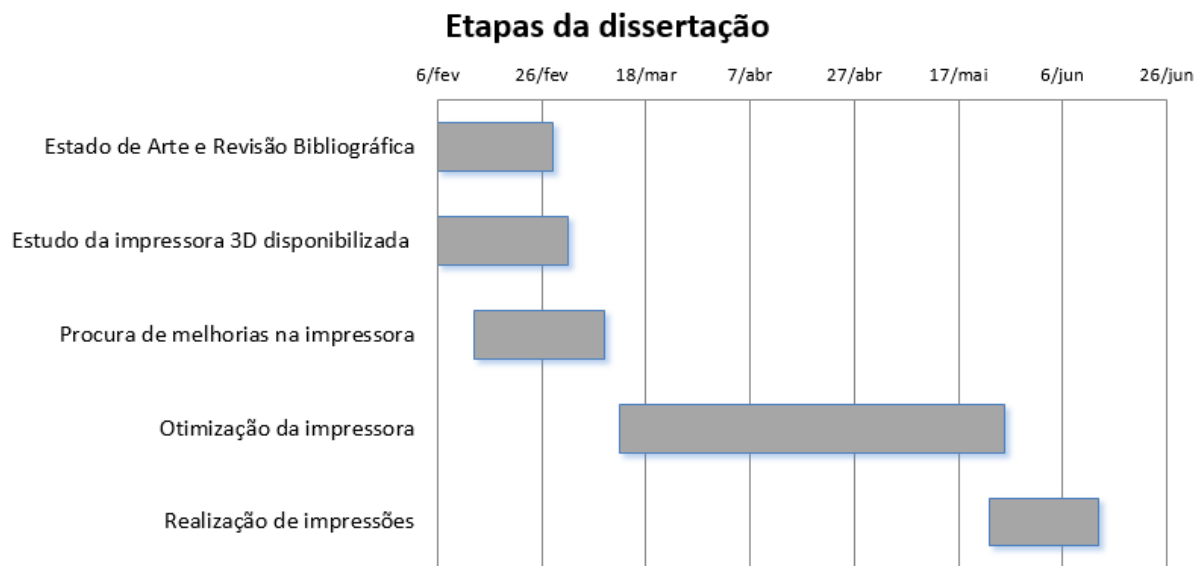


Figura 99 - Diagrama de *Gantt* com as etapas da realização da dissertação.

Tabela 11 – Datas aproximadas de início e fim da realização de cada etapa

Tarefa	Data de início	Fim	Duração (dias)
Estado de Arte e Revisão Bibliográfica	6/fev	28/fev	22
Estudo da impressora 3D disponibilizada	6/fev	3/mar	25
Procura de melhorias na impressora	13/fev	10/mar	25
Otimização da impressora	13/mar	26/mai	74
Realização de impressões	23/mai	13/jun	21

## ANEXO B: Configuração do firmware

Versão: Marlin 1.1.0-RC7

Representam-se de seguida as alterações efetuadas no *firmware* instalado na impressora 3D, a informação que não se encontra representada mantém-se inalterada a partir da versão original do *Marlin 1.1.0-RC7*.

### Configurations.h

Código	Funcionalidade
SERIAL_PORT 0	Porta de conexão da placa de Arduino.
BAUDRATE 250000	Comunicação da impressora para ligação por USB.
MOTHERBOARD BOARD_RAMPS_14_EFB	Placa RAMPS 1.4 ( <i>E=Extruder; F=Fan; B=Base</i> )
CUSTOM_MACHINE_NAME "Delta LDPS"	Nome atribuído à impressora.
EXTRUDERS 3	Número de alimentadores do <i>Diamond Extruder</i> .
SINGLENOZZLE	Definição de um único orifício do bico de extrusão para três alimentadores de filamento.
MIXING_EXTRUDER	Não definido, mas pode ser ativado para realizar mistura de filamento para obtenção de gradientes de cor.
POWER_SUPPLY 1	Fonte de alimentação ATX.
TEMP_SENSOR_0 1	Termístor do bico extrusor (100k).
TEMP_SENSOR_BED 1	Termístor da cama de impressão (100k).
HEATER_0_MAXTEMP 275	Valor máximo de 275 °C para a temperatura do bico extrusor.
BED_MAXTEMP 120	Valor máximo de 120°C para a temperatura da cama de impressão.
PIDTEMP	Ativação do controlo PID para obtenção dos valores da temperatura.
DEFAULT_Kp 42.54 DEFAULT_Ki 1.69 DEFAULT_Kd 275.98	Constantes PID obtidas após calibração da temperatura do bico extrusor.
DEFAULT_bedKp 10.00 DEFAULT_bedKi .023 DEFAULT_bedKd 305.4	Constantes PID obtidas após calibração da temperatura da cama de impressão.
DELTA	Definição da geometria da impressora como Delta.

DELTA_CALIBRATION_MENU	Ativação dos menus de calibração para a delta.
DELTA_DIAGONAL_ROD 260.3	Variável geométrica.
DELTA_SMOOTH_ROD_OFFSET 177.0	Variável geométrica.
DELTA_EFFECTOR_OFFSET 25.0	Variável geométrica
DELTA_CARRIAGE_OFFSET 17.0	Variável geométrica
DELTA_PRINTABLE_RADIUS 100.0	Raio da área de impressão.
Z_MIN_POS -30	Valores negativo para calibração. Após calibração alterar valor para 0.
MANUAL_Z_HOME_POS 600	Altura disponível para impressão.
DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {160, 160, 160, 48.35}	Passos/mm dos motores de passos dos três eixos e dos alimentadores.
DEFAULT_MAX_FEEDRATE (100,100,100,25)	Velocidade máxima de <i>feedrate</i> para X,Y,Z e E.
X_MAX_ENDSTOP_INVERTING TRUE	Ativação do fim de curso do eixo xx.
Y_MAX_ENDSTOP_INVERTING TRUE	Ativação do fim de curso do eixo yy.
Z_MAX_ENDSTOP_INVERTING TRUE	Ativação do fim de curso do eixo zz.
LCD_LANGUAGE pt	Português como linguagem exibida no LCD.
SDSUPPORT	Possibilidade de utilização de um cartão SD.
REPRAP_DISCOUNT_FULL_GRAPHIC SMART_CONTROLLER	Seleção do tipo de painel de controlo e LCD.
U8GLIB_SH1106	Biblioteca de caracteres.
DEFAULT_NOMINAL_FILAMENT_DIA 1.75	Definição do diâmetro de filamento utilizado

### Configurations\_adv.h

Código	Funcionalidade
#define MICROSTEP_MODES {32,32,32,8,8,8}	Nº de bits de resolução dos motores de passo (X, Y, Z, E0, E1, E0)

## Pins\_ramps.h

Código	Funcionalidade
#define RAMPS_D8_PIN 8	Controlo PWM da resistência associado à cama de impressão.
#define RAMPS_D9_PIN 10	Controlo PWM da resistência associada ao aquecimento do extrusor.
#define RAMPS_D10_PIN 9	Controlo PWM da ventoinha associada ao arrefecimento do material extrudido.
#define E2_STEP_PIN 64 #define E2_DIR_PIN 59 #define E2_ENABLE_PIN 44	Associação da placa de extensão de um motor de passo aos pinos da placa RAMPS 1.4

O esquemático dos pinos da placa RAMPS 1.4 representa-se na Figura 100.

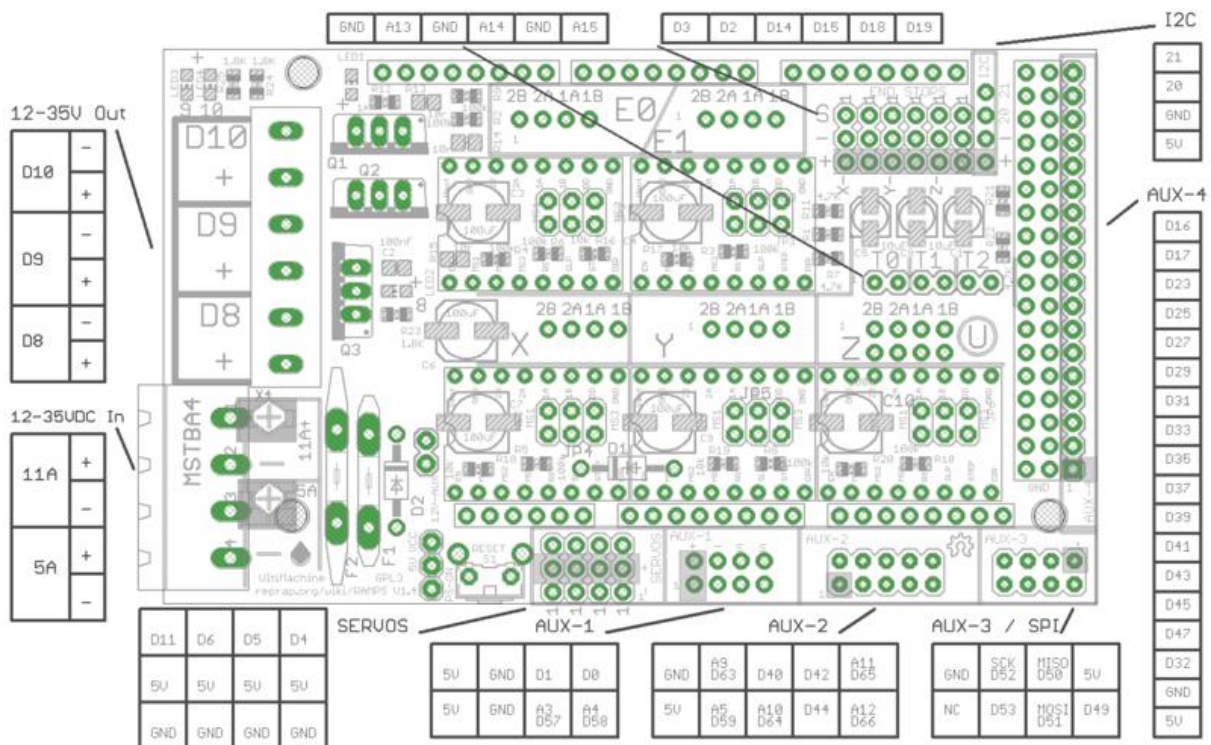


Figura 100 – Representação esquemática dos pinos da placa RAMPS 1.4 [35].

## ANEXO C: Placa para organização das ligações elétricas

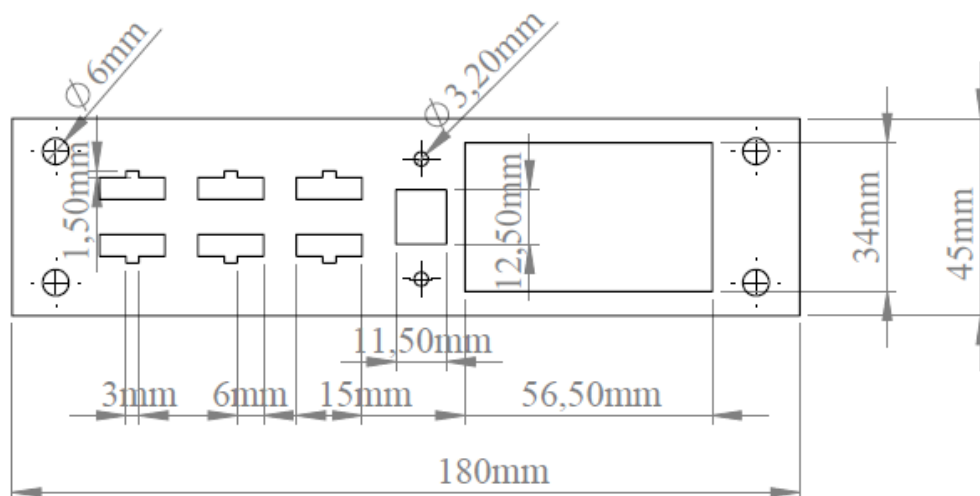


Figura 101 - Desenho técnico da placa para organização das ligações elétricas.



## ANEXO D: Base inferior para fixação da torre dos três eixos

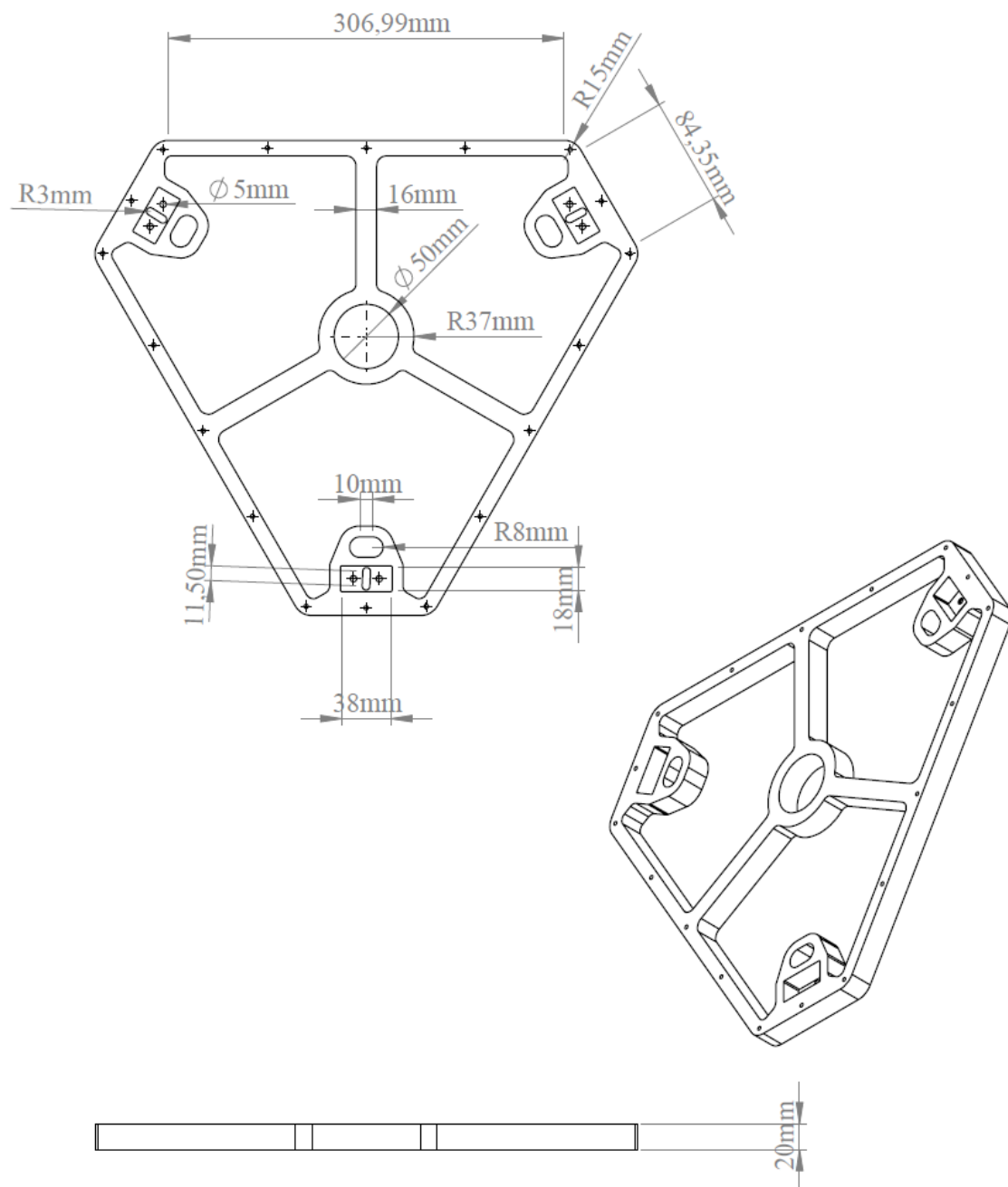


Figura 102 - Desenho técnico da base inferior em alumínio.

## ANEXO E: Base superior para fixação das torres dos três eixos

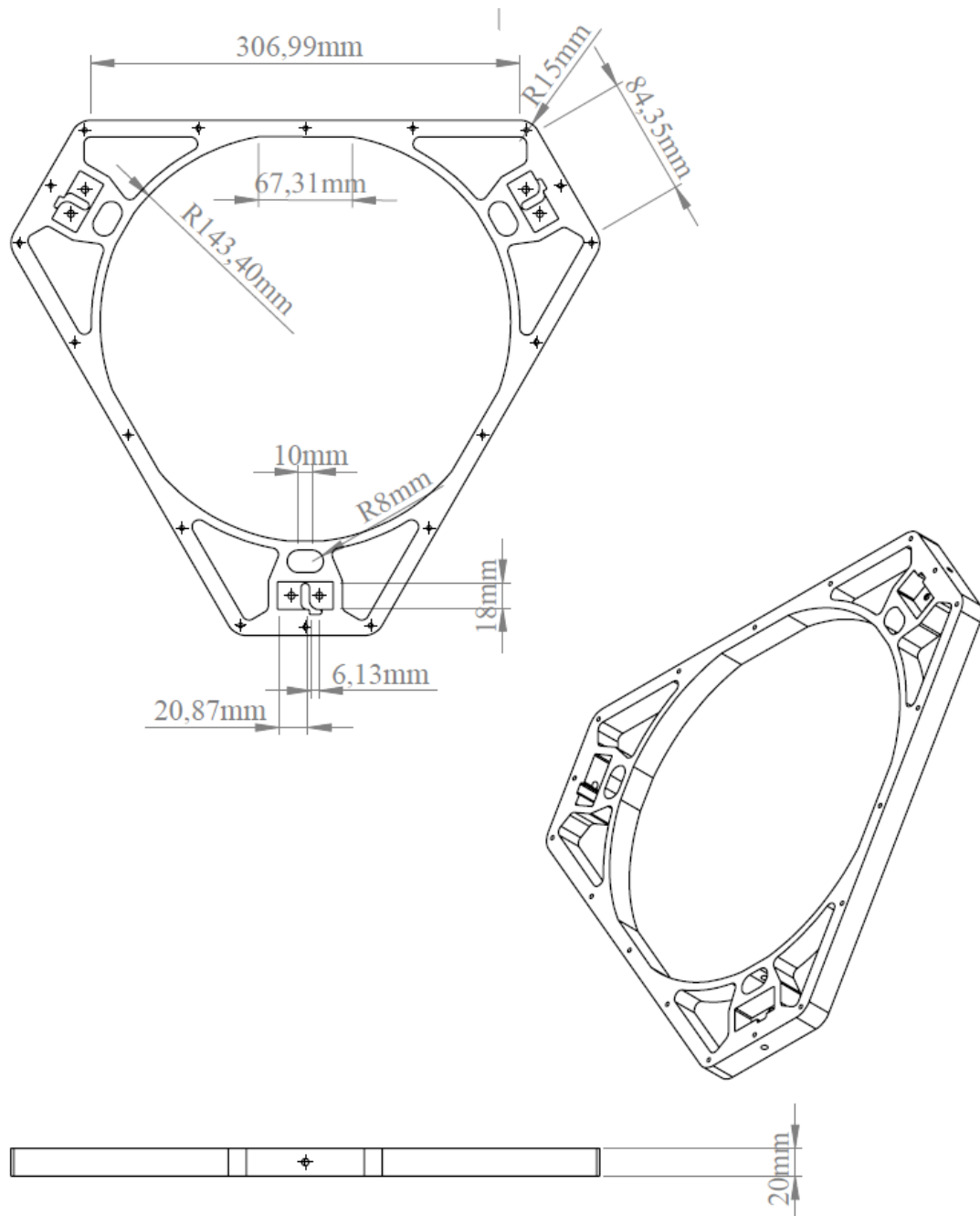


Figura 103 - Desenho técnico da base superior em alumínio.

## ANEXO F: Suporte da cama de impressão

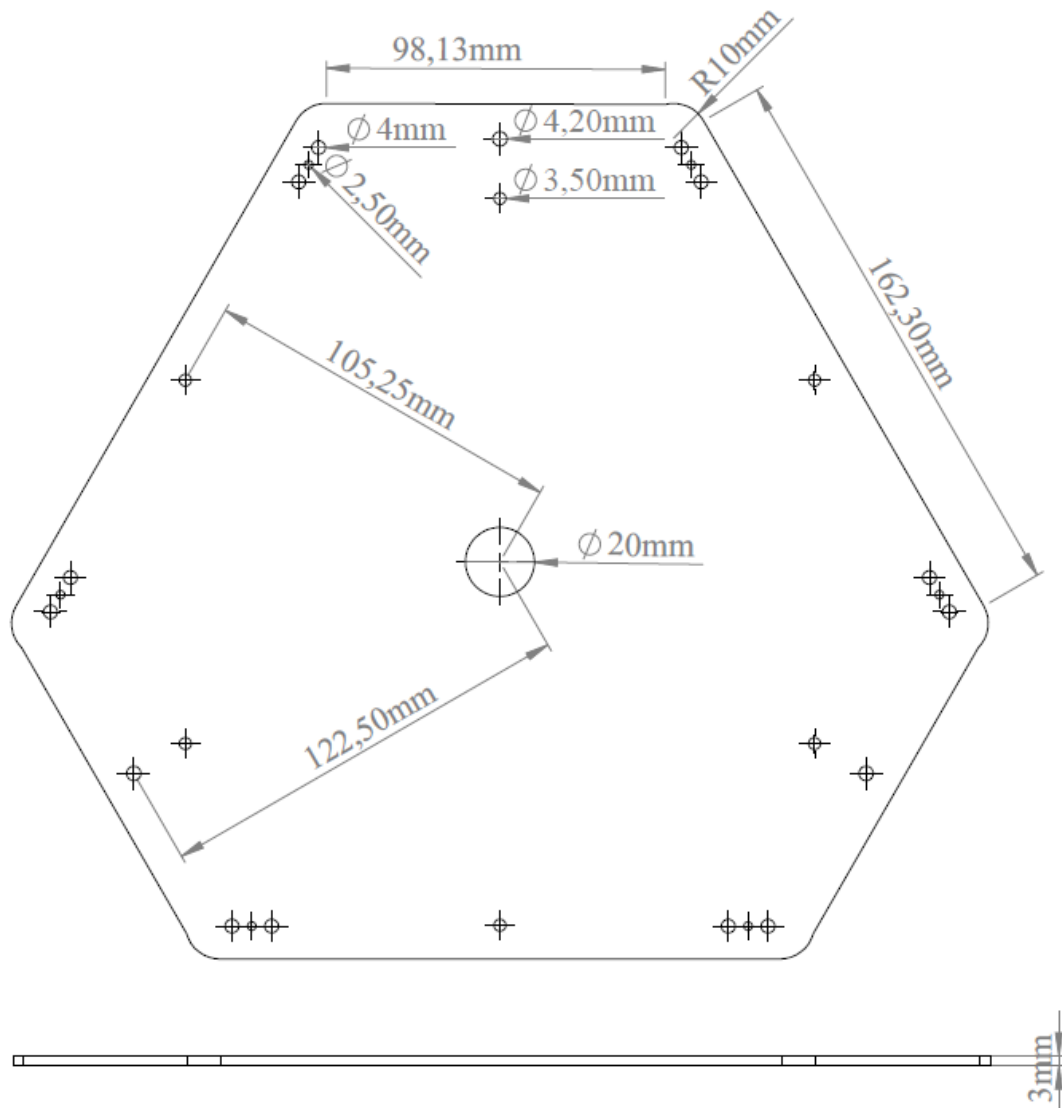


Figura 104 - Desenho técnico do suporte da cama de impressão.

### Notas:

- Seis furos circulares (distância ao centro de 105,25 mm) de diâmetro 3,50 mm servem para fixação da base de impressão em alumínio e do isolamento em cortiça ao suporte.
- Três furos circulares (distância ao centro de 122,50 mm) de diâmetro 4,20 mm servem para fixação do suporte à base inferior da impressora através dos parafusos de ajuste.
- Furo central serve para passagem dos fios elétricos do termistor e da resistência da base de impressão até à placa RAMPS no interior da base inferior da impressora.

## ANEXO G: Manual de boas práticas

O presente anexo servirá como leitura introdutória para quem pretenda iniciar a realização de impressões através da utilização da impressora otimizada ao longo da dissertação.

Para utilização correta da impressora, deve ter-se em atenção alguns aspetos que poderão ser divididos em três etapas:

1) Calibração; 2) Alimentação de filamento; 3) Impressão.

### 1. Calibração

- Verificação da nivelção horizontal da base de impressão através da utilização de uma bolha de nível;
- Assegurar a verticalidade das torres dos eixos X, Y e Z;
- Confirmação do posicionamento do fim-de-curso em cada uma das torres à mesma altura relativamente à base de suporte para a cama de impressão.

Estes três pontos necessitam de ser verificados aquando da montagem estrutural da impressora.

Quanto à calibração da cama de impressão deverá ser feita através do *Pronterface*, pelo método iterativo demonstrado na Figura 105, em que a verificação da distância de 0,1 mm do bico extrusor à cama de impressão é feita através da resistência oferecida pelo bico à passagem de uma folha de papel.

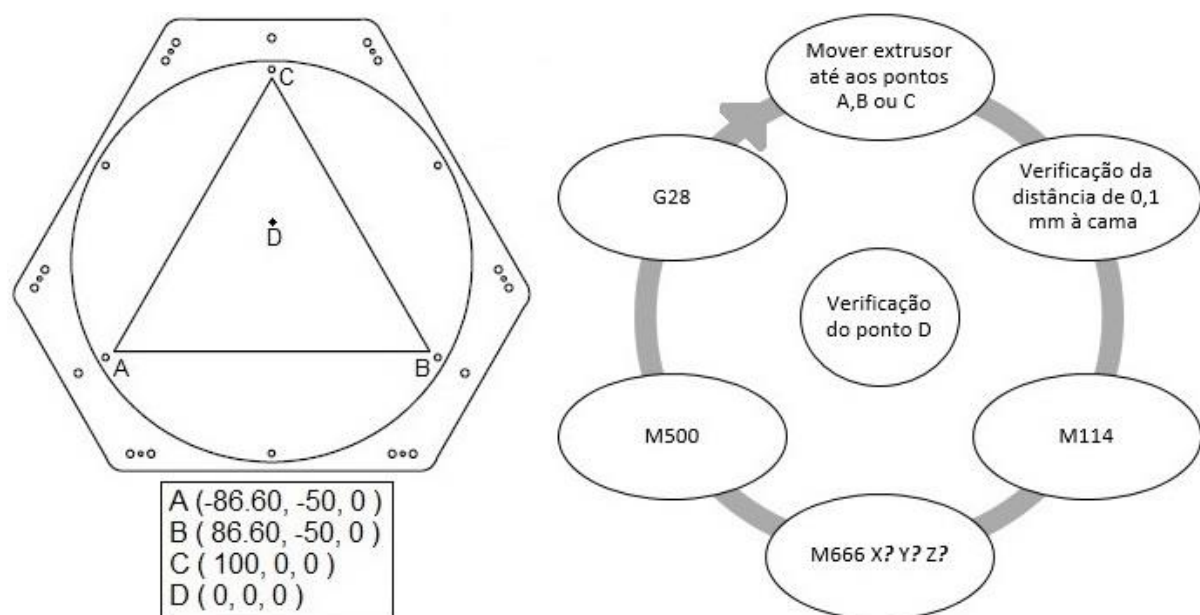


Figura 105 – Método de calibração da cama de impressão.

Nota:

D -> Ponto central para verificação final se a cama não se apresenta deformada.

- G28 – Movimentação para a posição de origem;
  - M666 – Compensação do fim-de-curso;
  - M114 – Leitura da posição exata do extrusor;
  - M500 – Gravação dos dados no firmware.
- Controlo PID das temperaturas do bico extrusor e da cama de impressão:

Esta verificação deverá ser realizada através da utilização de uma termopar e respetiva comparação da temperatura lida com a que é fornecida pelo *firmware* da impressora no painel LCD representado na Figura 106. A temperatura superior representa o valor da temperatura com que se enviou o comando sendo que a temperatura inferior representa a temperatura nesse mesmo instante.

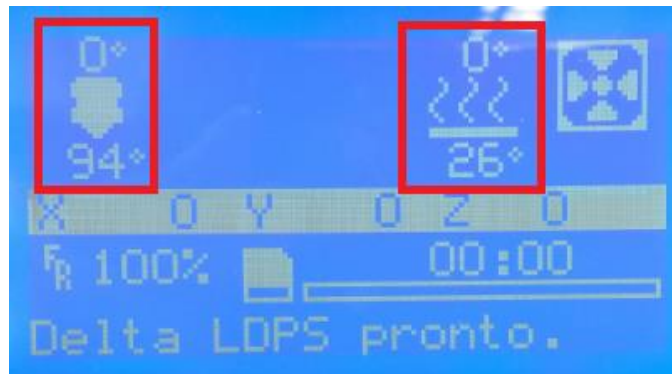


Figura 106 - Verificação da temperatura através do firmware.

## 2. Alimentação de filamento

Antes de realizar a impressão, deve ser colocada fita de *kapton* na superfície da base de impressão para uma remoção facilitada da peça sem que ocorram deformações na mesma.

Garantir através do *firmware* que os três filamentos se encontrem à entrada do bico extrusor. Isto ocorre quando os motores de passo dos alimentadores oferecem resistência. Esta resistência significa que o filamento se encontra no ponto do *diamond extruder* em que para passar terá que ser extrudido. Os incrementos devem ser reduzidos para que o motor de passo do alimentador não possa ser danificado. Para realizar estes mesmos incrementos deverá aceder-se ao menu do *firmware*:

*PREPARAR -> MOVER EIXO -> SELECIONAR EXTRUSOR*

Depois de garantir a correta alimentação do filamento, deve-se aquecer o bico extrusor dentro do intervalo de 200°C – 220°C (caso o filamento a extrudir seja PLA) e após estabilização da temperatura extrude-se os três filamentos separadamente para que se verifique que nenhuma das entradas se encontra obstruída.

Aconselha-se a implementação pelo *Slic3r* de uma *skirt* no início da impressão, para que quando se inicie a impressão da peça o fluxo de filamento que se encontre a ser extrudido já se tenha estabilizado.

### 3. Impressão

Para impressão a três cores deverão ser carregados os diferentes ficheiros STL para posterior *assembly* no *Repetier-Host*, com isto é possível associar cada um destes mesmo ficheiros a um alimentador e permitir assim a impressão de várias cores numa mesma impressão. Esta mesma associação encontra-se representada na Figura 107.

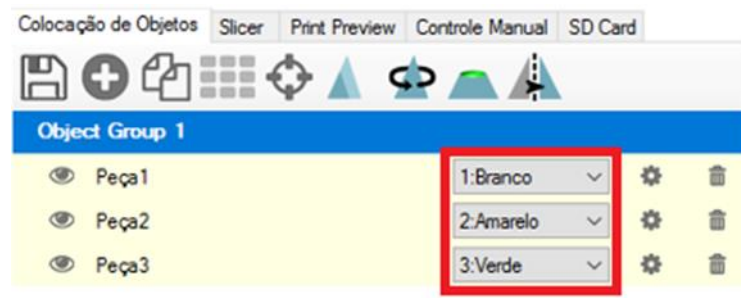


Figura 107 - Associação de ficheiro STL aos diferentes alimentadores.

Para que se possa alterar a cor de filamento a ser extrudida manualmente deverá proceder-se à alteração do extrusor a ser enviado o comando contido no *g-code* através da opção no *Repetier-Host* destacada na Figura 108.

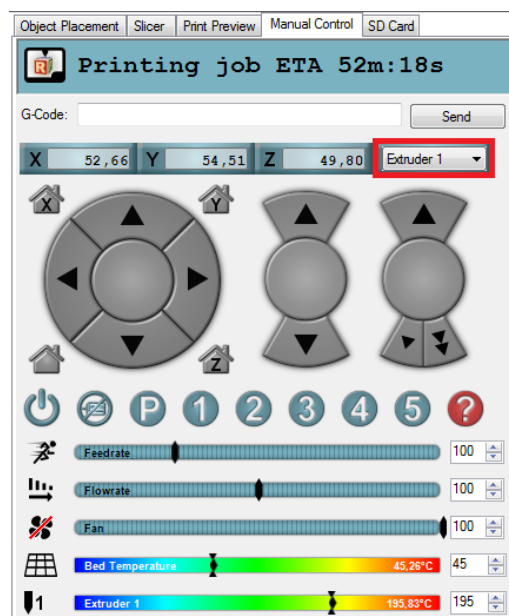


Figura 108 - Alteração manual do filamento a ser extrudido.

No fim da impressão, a peça deverá ser retirada quando a cama de impressão já se encontre a uma temperatura próxima da temperatura ambiente para que não ocorram deformações aquando da sua remoção.